

SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS E ESTUDO DA POSSIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO DOS SEDIMENTOS EM ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE PRAIAS

LUÍSA FERNANDES LAMEIRO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Professor Doutor Francisco Taveira Pinto

JUNHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À memória da minha avó

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Taveira Pinto expresse o meu profundo agradecimento pela sua orientação, pelo seu rigor e compreensão.

Ao Engenheiro Joaquim Pais Barbosa pela disponibilidade e colaboração.

À minha família por todo o incentivo.

A todos os meus amigos, em especial ao Sérgio, ao Gustavo e à Andreia pelo apoio técnico, à Cátia e ao João pela paciência e encorajamento, à Carolina, Chantelle e Joana pela boa disposição transmitida e à Sara pela sua preciosa amizade.

RESUMO

Grande parte dos sedimentos que naturalmente seriam transportados pelos cursos de água até ao mar encontra, hoje em dia, no seu percurso uma barreira (uma barragem) e deposita-se na albufeira, temporária ou definitivamente diminuindo o volume de armazenamento de água disponível e agravando a erosão que de forma geral se faz sentir ao longo da zona costeira adjacente à foz dos rios.

A perda de território para o mar e os riscos associados comprometem também o futuro das populações, principalmente das que se fixaram no litoral, e portanto reveste-se de grande urgência e interesse de todos, procurar uma solução que permita controlar esse efeito da melhor forma possível.

É importante perceber que os sedimentos das albufeiras podem ser utilizados como um recurso e não como um resíduo. A componente de areia poderia ser utilizada para a alimentação de praias, enquanto que o resto poderia ser utilizado para outros fins, como por exemplo para aplicação na construção civil. Para além disso, o recurso a meios de remoção dos sedimentos depositados permitirá a reabilitação das albufeiras que sofrem actualmente a influência dessa sedimentação, recuperando a sua capacidade inicial de armazenar água.

O presente trabalho pretende dar a conhecer de forma o mais objectiva possível o processo de sedimentação em albufeiras, a teoria em que assenta o transporte sedimentar, as metodologias de determinação da quantidade de sedimentos depositados nas albufeiras e as diversas técnicas de remoção dos sedimentos depositados.

Refere-se o tratamento necessário ao reaproveitamento dos sedimentos com vista à alimentação artificial de praias. Expõem-se alguns casos internacionais que traduzem a dimensão que a alteração do transporte sedimentar dos rios causada pela construção de barragens pode, por vezes atingir.

Descrevem-se as alterações no transporte sedimentar fluvial induzidas pela construção de barragens nos principais rios Portugueses. Analisa-se, com base nos valores dos volumes mortos, a actual situação de 166 albufeiras Portuguesas quanto à deposição de sedimentos a fim de obter uma ordem de grandeza dos sedimentos disponíveis e pré-seleccionar as albufeiras que potencialmente poderiam vir a integrar um projecto de aproveitamento dos sedimentos para alimentação artificial de praias.

Apresentam-se as medidas que estão a ser tomadas actualmente em Portugal no sentido de recolher informação relativa aos sedimentos transportados nos cursos de água e que poderá abrir caminho à realização de estudos mais cuidados que permitam refinar a pré-selecção de albufeiras apresentada. Referem-se as dificuldades inerentes à implementação de projectos de aproveitamento dos sedimentos para alimentação artificial das praias Portuguesas.

Este trabalho foi desenvolvido como um ponto de partida e até incentivo à realização de outros estudos que o possam completar e melhorar com o objectivo de, no fim, se poder ver implementado um esquema nacional de aproveitamento dos sedimentos, que se considera ser uma mais-valia para a economia do país e que se encontram hoje na sua grande maioria completamente desaproveitados.

PALAVRAS-CHAVE: Sedimentos, erosão, deposição, albufeiras, praias.

ABSTRACT

Much of the sediments that would be naturally transported by river flows to the sea, today, are trapped by a barrier (the dam) and deposition occurs in the reservoirs, reducing the volume of water storage available for river regulation and exacerbating the erosion which in general is felt along the coast.

The loss of territory to the sea and related risks compromise also the future of the people, especially those set on the coast, and thus is of great urgency and interest of all, to seek a solution to control this problem the best way possible.

It is important to realize that the sediments of reservoirs can be used as a resource and not as waste. The component of sand could be used to feed the beaches while the rest could be used for other purposes such as for application in construction. Furthermore, the removal of deposited sediments will allow the rehabilitation of reservoirs which are currently affected by sedimentation, recovering its initial capacity to store water.

This work aims to show in an objective way the sedimentation process in reservoirs, the theory that underlies the sediment transport, the methodologies for determining the amount of sediments deposited in reservoirs and the various techniques for removal of deposited sediments.

The necessary treatment to reuse the sediments in order to artificially feed the beaches is refereed. Some cases reflecting the international dimension that can sometimes achieve the change of sediment transport in rivers caused by the construction of dams are presented.

The changes in fluvial sediment transport induced by the construction of dams on major Portuguese rivers are described. Based on the values of dead volumes, the current situation of 166 Portuguese reservoirs is analysed in order to obtain an order of magnitude of sediments available and pre-select the reservoirs that could potentially integrate a reuse project of artificial feeding of beaches.

There are measures being taken today in Portugal to collect information on sediment transport in rivers and that information may open way for more accurate studies aiming to refine the pre-selection of reservoirs made. The difficulties of implementing projects for use of sediments to artificially feed the Portuguese beaches are highlighted.

This work was carried out as a starting point and to encourage future studies that could expand and improve, in order to, at the end, to implement a national plan for the exploitation of sediments considered to be a “added – value” to the economy and that are today, the vast majority, completely unexploited.

KEYWORDS: Sediments, erosion, deposition, reservoirs, beaches.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2. OBJECTIVOS E ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2. A SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS	5
2.1. EROSÃO, TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS	5
2.2. CASOS INTERNACIONAIS	12
2.1.1. INTRODUÇÃO	12
2.1.2. HIMALAIAS.....	16
2.1.3. RIO AMARELO	18
2.1.4. SUIÇA	24
2.1.5. ESPANHA, SERRA DE GÁDOR	26
3. METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS.....	31
3.1. TRANSPORTE E SEDIMENTOS.....	31
3.1.1. INTRODUÇÃO	31
3.1.2. INÍCIO DO MOVIMENTO	31
3.1.3. TRANSPORTE EM SUSPENSÃO	35
3.1.4. TRANSPORTE POR ARRASTAMENTO	36
3.1.4. TRANSPORTE TOTAL VS TRANSPORTE POR ARRASTAMENTO	38
3.1.5. RECOLHA DE AMOSTRAS E ANÁLISE LABORATORIAL.....	39
3.2. MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE SEDIMENTOS DEPOSITADOS EM ALBUFEIRAS	43
3.1.1. INTRODUÇÃO	43
3.1.2. MODELOS MATEMÁTICOS E FÍSICOS.....	43
3.1.3. AMOSTRAGEM DE SEDIMENTOS E MEDIÇÃO DE CAUDAIS	47
3.1.4. LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS	49

4. ANÁLISE DO CASO PORTUGUÊS E METODOLOGIAS DE APROVEITAMENTO DOS SEDIMENTOS	51
4.1. METODOLOGIAS DE CONTROLO E EXTRACÇÃO DE SEDIMENTOS	51
4.1.1. INTRODUÇÃO	51
4.1.2. MINIMIZAÇÃO DA AFLUÊNCIA DE SEDIMENTOS.....	51
4.1.4. REMOÇÃO DOS SEDIMENTOS ACUMULADOS	58
4.2. METODOLOGIAS DE TRATAMENTO DOS SEDIMENTOS.....	65
4.3. ANÁLISE DO CASO PORTUGUÊS	68
4.3.1. INTRODUÇÃO	68
4.3.2. ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA EM PORTUGAL	72
4.3.3. ESTIMATIVA E ANÁLISE DA SEDIMENTAÇÃO ACTUAL NAS PRINCIPAIS ALBUFEIRAS PORTUGUESAS.....	83
 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	 97
5.1. CONCLUSÕES.....	97
5.2. SUGESTÕES	98
BIBLIOGRAFIA	101

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Movimentos de massa (Lencastre e Franco (2006)).....	6
Fig.2.2 – Balanço do solo no estado natural (Lencastre e Franco (2006)).	6
Fig.2.3 – Erosão de encosta (Lencastre e Franco (2006)).....	7
Fig.2.4 – Movimento das partículas (Lencastre e Franco (2006)).....	8
Fig.2.5 – Classificação dos diversos troços de um curso de água relativamente ao transporte de sedimentos (adaptado de Lysne et al., (2003)).	8
Fig.2.6 – Delta do Nilo (http://www.sanasa.com.br/noticias/not_con3.asp?par_nrod=555&flag=TK-2).	9
Fig.2.7 – Perfil Longitudinal de um curso de água (adaptado de http://sites.google.com/site/geologiaebiologia/_/rsrc/1219775711387/Home/geologia-problemas-e-materiais-do-quotidiano/bacias-hidrogr%C3%A1ficas/).	9
Fig.2.8 – Previsão da erosão a jusante de uma barragem proposta para a Stiegler's Gorge, Tanzânia (adaptado de Lysne et al. (2003)).	10
Fig.2.9 – Padrão típico de deposição dos sedimentos nas albufeiras (http://www.dha.lnec.pt/nre/english/projects/sedim_eng.html)	10
Fig.2.10 – Balanço de sedimentos numa albufeira (adaptado de Batuca e Jordaan (2000)).....	11
Fig.2.11 – Construção de barragens por década no mundo (adaptado de Molino, (2003)).....	12
Fig.2.12 – Construção de barragens por década na Europa (adaptado de Molino, (2003)).	13
Fig.2.13 – Distribuição global do volume de armazenamento das albufeiras (adaptado de Molino (2003)).	13
Fig.2.14 – Relação entre a idade das barragens e a perda de capacidade de armazenamento ((ICOLD, 1998) adaptado de Molino, (2003)).	14
Fig.2.15 – Distribuição mundial de sedimentos (Støle (2008)).	15
Fig.2.16 – Distribuição mundial de precipitação (Støle (2008)).	15
Fig.2.17 – Concentração de sedimentos e caudais observados no rio Kali Gandaki, Nepal 1986 (Støle (1993)).	16
Fig.2.18 – O rio Amarelo e parte do seu delta (Wang (2003)).	18
Fig.2.19 – Representação da cheia provocada pelo exercito chinês em 1938 em Huayunkou (Wang (2003))... ..	19
Fig.2.20 – Representação dos diversos canais criados pelas avulsões do rio Amarelo (Wang (2003)).	20
Fig.2.21 – Variação da precipitação e da carga sedimentar do baixo rio Amarelo (adaptado de Wang (2003)). ..	21
Fig.2.22 – Área da albufeira Sanmenxia (Wang (2003)).....	22
Fig.2.23 – Variação da elevação de Tong-guan ao longo do tempo (adaptado de Wang (2003)).	23
Fig.2.24 – Elevação do nível de água na estação hidrológica de Huaxian (adaptado de Wang (2003)).	23
Fig.2.25 – Albufeira Brienzen (http://homepage.ntlworld.com/paul.j.parkinson/photos.html).	24
Fig.2.26 – Média mensal de 10 anos de carga sedimentar medidas na estação Aare – Brienzenwiler (Spreafico e Grasso (2003)).	25

Fig.2.27 – Albufeira Thun (http://www.thunersee.com).	26
Fig.2.28 – Localização das bacias (...) e das fronteiras hidrológicas (____) em estudo na Serra de Gádor (Martín-Rosales et al. (2003)).....	27
Fig.2.29 – Localização topográfica dos pontos de recolha das amostras dos sedimentos em suspensão (Martín-Rosales et al. (2003)).	28
Fig.2.30 –Relação entre os sedimentos em suspensão e a área das bacias (Martín-Rosales et al. (2003)).....	29
Fig.3.1 – Forças a que as partículas expostas ao escoamento estão sujeitas (adaptado de Støle (2008)).....	32
Fig.3.2 – Velocidade de deposição de esferas de quartzo em água e ar (adaptado de Lysne et al. (2003)).....	32
Fig.3.3 – Diagrama de Shields (adaptado de Lysne et al. (2003)).	34
Fig.3.4 – Diagrama de Hunter Rouse (adaptado de Lysne et al. (2003)).	36
Fig.3.5 – Configurações do leito num escoamento de “fundo móvel” (Lencastre e Franco (2006)).....	36
Fig.3.6 – Relação entre transporte por arrastamento e transporte total (adaptado de Lysne et al. (2003)).....	39
Fig.3.7 – Amostrador US RBMH-80 para recolha de material do leito (http://www.rickly.com/ss/bedmaterial.htm).40	
Fig.3.8 – Amostrador para recolha de sedimentos transportados por arrastamento (http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/sedim/e_bed.htm).....	40
Fig.3.9 – Amostrador de Nilsson para recolha de sedimentos transportados em suspensão (http://lindorm.com/products/nilsson.php).....	41
Fig.3.10 – Tubo de acumulação visual (http://www.rickly.com/sai/VASTA99.htm).....	42
Fig.3.11 – Difractor a laser Coulter LS230 (http://www.kitmondo.com/images%5Clisting%5CBeckmann%20Coulter.jpg).	42
Fig.3.12 – Ábaco para determinação do factor de erodibilidade do solo, retirado de Lencastre e Franco, 2006...46	
Fig.3.13 – Sedimentos de grandes dimensões retidos numa albufeira (Støle (2008)).....	48
Fig.3.14 – Curva de Brune (Støle (2008)).	48
Fig.3.15 – Equipamento do INAG (retirado de Álvares et al. (2000)).	50
Fig.4.1 – All-American Canal, no rio Colorado, no estado da Califórnia nos EUA (http://www.allposters.co.uk/-sp/The-All-American-Canal-as-the-Blazing-Sun-Sets-in-the-West-near-Yuma-Arizona-Posters_i3991549_.htm). 53	
Fig.4.2 – Sistema de passagem de sedimentos com galeria de desvio na albufeira Amsteg, no rio Reuss, na Suíça (adaptado de , Batuca e Jordaan (2000)).....	53
Fig.4.3 – Albufeira Knellpoort de armazenamento fora de curso na Africa do Sul, (Batuca e Jordaan (2000)).....	54
Fig.4.4 – Representação esquemática do processo de passagem de sedimentos ou “sluicing” (adaptado de Støle (2008)).....	56
Fig.4.5 – Diferentes formas de albufeiras (adaptado de Støle, 2008).	57
Fig.4.6 – Movimento das correntes de turbidez numa albufeira (adaptado de Batuca e Jordaan (2000).	58
Fig.4.7 – Passagem das correntes de turbidez através da barragem, (adaptado Batuca e Jordaan (2000)).....	58
Fig.4.8 – Lavagem de sedimentos, (adaptado Batuca et al., 2000).	59
Fig.4.8 – Remoção mecânica (http://www.urmi.pt/tramagal.htm).....	61

Fig.4.9 – Bucket-wheel (http://www.gendredge.com/nigeria/bucket.php).	62
Fig.4.10 – Dragagem com sifão (adaptado de Bатуca e Jordaan (2000)).	63
Fig.4.11 – Cabeça de sucção em forma de saxofone (adaptado de Bатуca e Jordaan (2000)).	63
Fig.4.12 – “Slotted pipe sediment sluicer” (adaptado de Bатуca et al., 2000).	64
Fig.4.13 – Esquema do processo de tratamento químico dos sedimentos (adaptado de Autoridade Portuária de Veneza (2004)).	67
Fig.4.14 – Esquema comparativo dos processos de abrasão e quebra (adaptado de Pétavy et al. 2008).	67
Fig.4.15 – Esquema do processo geral de tratamento dos sedimentos removidos das albufeiras com vista ao seu reaproveitamento (adaptado de V. Sánchez, 2008).	68
Fig.4.16 – Fonte: Ministério do ambiente, retirado do Jornal de Notícias de 21 de Abril de 2009 (retirado de Maia (2009)).	71
Fig.4.17 – Produção de sedimentos em Portugal (Couto e Rocha (1986), retirado de Rocha (1998)).	73
Fig.4.18 – Estuário do rio Douro.	74
Fig.4.19 – Laguna de Aveiro.	75
Fig.4.20 – Estuário do rio Minho.	75
Fig.4.21 – Estuário do rio Tejo.	76
Fig.4.22 – Estuário do rio Sado.	76
Fig.4.23 – Ria Formosa.	77
Fig.4.24 – Curvas granulométricas características para as estações do rio Tejo (Álvares (1997), retirado do PNA).	78
Fig.4.25 – Curvas granulométricas características para as estações do rio Guadiana (Álvares (1997), retirado do PNA).	79
Fig.4.26 – Estações com medição de caudal sólido em funcionamento nas décadas de 60 a 90 (retirado do PNA).	80
Fig.4.27 – Mapa de recolha de dados de sedimentos em suspensão (http://snirh.inag.pt/snirh/semida/docs/rede_sed.html)	81
Fig.4.28 – Mapa das estações da nova rede sedimentológica de Portugal, Álvares et al. (2001).	82
Fig.4.29 – Relação entre o volume de sedimentos depositados e a área da bacia hidrográfica para a região Norte.	84
Fig.4.30 – Relação entre o volume de sedimentos depositados e a área da bacia hidrográfica para a região Centro.	85
Fig.4.31 – Relação entre o volume de sedimentos depositados e a área da bacia hidrográfica para a região Sul.	85
Fig.4.32 – Localização das 166 albufeiras presentes no inventário do INAG.	86
Fig.4.33 – Regiões Hidrográficas de Portugal (http://www.aprh.pt/texto/mapa-port_reg-hidrog.html).	87
Fig.4.34 – Localização das albufeiras situadas a menos de 25 km da costa.	88
Fig.4.35 – Localização das albufeiras situadas a mais de 25 km e menos de 50 km da costa.	88
Fig.4.36 – Localização das albufeiras situadas a mais de 50 km e menos de 75 km da costa.	89

Fig.4.37 – Localização das albufeiras situadas a mais de 75 km e menos de 100 km da costa.....	89
Fig.4.38 – Localização das albufeiras seleccionadas.	93
Fig.4.39 – Deposição de sedimentos junto aos pilares de uma ponte (retirado de http://www.urmi.pt/tramagal.htm .)	94

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Resultados das inspecções do delta do rio Maggia (adaptado de Spreafico e Grasso (2003)).	25
Quadro 3.1 – Factores de técnica cultural para equação universal do solo (Lencastre e Franco (2006)).	45
Quadro 3.2 – Factores de práticas de conservação para equação universal do solo (Lencastre e Franco (2006)).	46
Quadro 4.1 – Principais técnicas de remoção dos diferentes tipos de sedimentos (adaptado de Sánchez, 2008).	59
Quadro 4.2 – Cargas poluentes em toneladas por ano (retirado do PNA).	68
Quadro 4.3 – Número de estações da rede sedimentológica em funcionamento até 1993/94 por bacia hidrográfica (retirado do PNA).	78
Quadro 4.4 – Diâmetros característicos do material de fundo nas estações do rio Tejo (Álvares (1997), retirado do PNA).	79
Quadro 4.5 – Diâmetros característicos do material de fundo nas estações do rio Guadiana (Álvares, 1997, retirado do PNA).	79
Quadro 4.6 – Albufeiras seleccionadas da Região Hidrográfica do Norte.	90
Quadro 4.7 – Albufeiras seleccionadas da Região Hidrográfica do Centro.	91
Quadro 4.8 – Albufeiras seleccionadas da Região Hidrográfica do Tejo.	91
Quadro 4.9 – Albufeiras seleccionadas da Região Hidrográfica do Alentejo.	92
Quadro 4.10 – Albufeiras seleccionadas da Região Hidrográfica do Algarve.	92

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- A – Área de exposição ao escoamento [m^2]
Área da secção de escoamento [m^2]
Perda de solo [$\text{ton}/(\text{ha}.\text{ano})$]
- a_a – Área arável [m^2]
- A_{bh} – Área da bacia hidrográfica [m^2]
- a_e – Área coberta com ervas rasteiras [m^2]
- a_f – Área florestal [m^2]
- a_r – Área superficial de resíduos [m^2]
- C – Factor de técnica cultural [-]
Concentração [ppm]
- C_A – Coeficiente de arrastamento [-]
- C_L – Coeficiente de sustentação [-]
- C_r – Capacidade da albufeira [m^3]
- C_S – Parâmetro de Shields [-]
- C_w – Concentração de sedimentos [kg/m^3]
- d – Diâmetro dos sedimentos [m]
- d_{50} – Diâmetro correspondente a 50% de finos [mm]
- d_{90} – Diâmetro correspondente a 90% de finos [mm]
- D_d – Densidade de drenagem [km^{-1}]
- E – Energia de uma chuvada [(kW.h)/ha]
- ER – Eficiência de retenção [%]
- F_e – Factor de ponderação das áreas [-]
- Fr – Número de Froude [-]
- g – Aceleração da gravidade [m/s^2]
- G – Factor de fragmentos grossos [-]
- g_s – Peso de sedimentos por unidade de tempo e largura [$\text{N}/(\text{ms})$]
- h – Profundidade de água
- i – Inclinação do leito [m/m]
- I – Intensidade da chuvada [cm/h]
- I_{30} – Intensidade da chuvada de 30 minutos mais intensa [cm/h]
- K – Factor de erodibilidade do solo [(kW.cm)/ha]

- L – Factor de comprimento [-]
- M – Coeficiente de Manning [-]
- P – Perímetro molhado
Factor de práticas de conservação [-]
Precipitação média anual [cm]
- P_{max} – Precipitação mensal média máxima [cm]
- q – Caudal unitário [m/s]
- Q – Caudal [m³/s]
- q_{pico} – Caudal de pico [m³/s]
- q_{sa} – Caudal sólido transportado por arrastamento [m³/(ms)]
- Q_{ma} – Caudal médio anual [m³]
- Q_s – Caudal sólido unitário transportado em suspensão [m/s]
- Q_{ST} – Volume unitário de sedimentos transportados em suspensão [m]
- Q_{sup} – Precipitação [mm/ha]
- R – Factor energético da chuva [(kW.cm)/ha]
- Re – Número de Reynolds [-]
- R_H – Raio Hidráulico [m]
- s – Inclinação do terreno [%]
- S – Factor de inclinação [-]
Produção diária de sedimentos [ton]
- S_a – Produção anual de sedimentos [cm/m²]
- S_{RA1-2} – Sedimentos retidos na albufeira [ton]
- t – Tempo [s]
- u – Velocidade média do escoamento [m/s]
- u* – Velocidade tangencial [m/s]
- u_C – Velocidade média do escoamento crítica [m/s]
- V – Velocidade de descarga [m/s]
- w – Velocidade de deposição das partículas [m/s²]
- γ_s – Peso volúmico dos sedimentos [N/m³]
- γ_w – Peso volúmico da água [N/m³]
- λ – Distância entre o início do escoamento e a mudança de inclinação do terreno [m]
- ν – Coeficiente de viscosidade cinemática da água [m²/s]
- ρ_s – Massa volúmica das partículas [Kg/m³]

ρ_w – Massa volúmica da água [Kg/ m³]

τ_0 – Tensão tangencial do leito [N/m²]

τ_c – Tensão tangencial critica [N/m²]

1

INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Durante muito tempo o Homem interferiu com a natureza de forma despreocupada e tendo apenas em mente o progresso da sociedade em que estava inserido. Esta forma de agir, destruindo e construindo, permitiu chegar aos dias de hoje, com todas as comodidades actualmente disponíveis, mas também com as preocupações ambientais consequentes, que não deixam de se fazer sentir.

De entre as diversas preocupações ambientais, sobre as quais, hoje, se reflecte um pouco por todo o mundo, releva-se a erosão costeira por estar directamente relacionada com o presente trabalho. A perda de território para o mar compromete o futuro das populações, principalmente das que se fixaram no litoral, e portanto reveste-se de grande urgência e interesse de todos, procurar uma solução que permita controlar esse efeito da melhor forma possível.

Subjacente à procura de uma solução estará sempre a compreensão da origem do problema, que tem sido alvo de investigações à escala mundial. Os resultados das diversas reflexões são dados a conhecer ao mundo através dos meios de divulgação habituais, partilhando-se assim pontos de vista e experiências e propiciando o envolvimento de outros.

Diversas explicações têm sido apresentadas, mas o Homem parece ser apontado como principal responsável, quer pela produção de gases que contribuem para o efeito de estufa e, elevando a temperatura da atmosfera, aceleram o degelo dos glaciares e a expansão da água dos oceanos, quer pela construção de barragens nas redes fluviais retendo a montante os sedimentos que iriam alimentar as praias, quer, ainda, pela construção de estruturas portuárias e outras estruturas que implicam a extracção de areia das dunas. Actualmente a erosão das praias, é assim, uma consequência de causas globais (a subida do nível médio da água do mar) e de causas locais, nas quais se inclui o défice na alimentação de sedimentos por esgotamento das fontes, Costa 2005.

A par das preocupações relacionadas com a erosão costeira, existe portanto um outro problema ambiental relacionado com a deposição de sedimentos nas albufeiras.

As albufeiras desempenham um papel importante no aproveitamento dos recursos hídricos, contudo é um dado adquirido que essas albufeiras são responsáveis pela alteração do padrão de transporte de sedimentos. Dependendo das condições locais e da capacidade de regularização das albufeiras os sedimentos que chegam à barragem podem encontrar uma barreira intransponível, depositando-se na albufeira e diminuindo o volume de armazenamento de água disponível para a regularização do rio. Assim, as albufeiras serão, mais tarde ou mais cedo, confrontados com as consequências da sedimentação e serão transformados em albufeiras de sedimentos, armazenando enormes volumes de gravilha, areia, silte, argila e matéria orgânica. Contudo os sedimentos transportados pelo rio não

representam unicamente um problema, uma vez que estes representam também um papel importante em diversas áreas como em projectos de regulação de rios, alimentação de praias, fertilização de terrenos para a agricultura e construção civil.

Uma considerável parte de terrenos utilizados para cultivo deve a sua formação a processos de sedimentação dos rios. A utilização destas terras pelo Homem, em muitas áreas, requer trabalhos de protecção contra cheias, que por sua vez requerem muitos agregados para paredes de protecção e nivelamento de grandes áreas, pelo que, a implementação de sistemas de remoção dos sedimentos das albufeiras, para além de reduzir problemas relacionados com a sua deposição, forneceria material necessário para diversos trabalhos de engenharia civil.

O cascalho e a areia são materiais de construção importantes, usados em grandes quantidades na maioria dos trabalhos de construção civil. Nas albufeiras os sedimentos são dispostos de acordo com o seu tamanho devido à relação entre as suas velocidades de sedimentação e dimensões. Utilizando técnicas apropriadas para controlar a remoção dos sedimentos das albufeiras é possível efectuar uma selecção relativamente ao tamanho das partículas removidas.

A fonte de sedimentos disponível nas albufeiras revela-se uma fonte preferencial de material para alimentação das praias, uma vez que, uma origem natural dos sedimentos das praias são precisamente as bacias hidrográficas e portanto, parte dos sedimentos retidos nas albufeiras, iriam naturalmente alimentar as praias, caso o seu transporte pelos rios não tivesse sido interrompido pela mão do Homem. Desta simples constatação poder-se-á esperar que, em parte, as propriedades de sedimentos depositados nas albufeiras sejam próximas das dos sedimentos que encontramos nas praias, o que sugere, à partida, que a solução dos dois problemas esteja intrinsecamente relacionada.

Interessa então procurar meios de remoção dos sedimentos que se depositam nas albufeiras e, de forma complementar, meios de fornecer sedimentos às praias que se encontram em risco de desaparecer, devido à agressiva erosão costeira que se tem feito sentir.

1.2. OBJECTIVOS E ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho tem como objectivo geral a análise dos processos de sedimentação em albufeiras e das metodologias de determinação da quantidade de sedimentos disponíveis, com vista ao estudo da possibilidade de utilização dos sedimentos em alimentação artificial de praias. Ainda no âmbito deste trabalho, está o confronto de casos de estudo internacionais que comprovam a existência do problema da sedimentação das albufeiras, a fim de elaborar propostas e metodologias a implementar para a reutilização dos sedimentos.

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. Neste capítulo, *Introdução e Objectivos*, é exposto o problema de forma genérica assim como os objectivos do trabalho. Um segundo capítulo, *Processos de Sedimentação em Albufeiras*, onde será feita a descrição dos processos de sedimentação, apresentando as diferentes dinâmicas envolvidas na transformação dos sedimentos, desde que estes se formam até que são depositados no fundo das albufeiras. Ainda neste capítulo são referidos alguns casos internacionais que ilustram a problemática da sedimentação nas albufeiras, contribuindo para uma melhor percepção do problema. No terceiro capítulo, *Metodologias de Avaliação da Sedimentação em Albufeiras*, serão apresentados alguns métodos matemáticos, desenvolvidos para auxílio na determinação dos volumes de sedimentos depositados, ao longo do tempo, nas albufeiras. O quarto capítulo, denominado *Metodologias de Aproveitamento dos Sedimentos e Análise do Caso Português*, distingue-se dos precedentes por se revestir de um carácter mais prático, retratando a situação nacional e propondo medidas a implementar no País, de forma a possibilitar o já referido

aproveitamento. Por fim, um último capítulo, *Considerações Finais*, onde serão referidas as principais conclusões obtidas com este trabalho.

2

A SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS

2.1. EROSÃO, TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS

Uma barragem representa, numa primeira abordagem, uma barreira intransponível à generalidade dos sedimentos que chegam à albufeira. A quantidade de sedimentos que consegue transpor essa barreira depende, entre diversos factores, da densidade de barragens presente num curso de água e do tipo de aproveitamento. Em cursos de água com elevada densidade de barragens construídas a capacidade de transporte de sedimentos pelo rio será reduzida, devido à redução das velocidades de escoamento provocada pela cascata de albufeiras. Em aproveitamentos a fio de água a passagem dos sedimentos para jusante da barragem deverá ser facilitada pela tipologia da própria barragem, enquanto que em regularizações a longo termo as albufeiras devem ter volume suficiente para albergar todos os sedimentos que ali chegam, assim como, para manter as funções a que se destina durante o período de vida previsto em projecto. As barragens retêm, assim, os sedimentos transportados pelo rio alterando as condições de transporte de sedimentos a jusante da barragem. Os sedimentos depositados nas albufeiras são o resultado natural da erosão da bacia hidrográfica, que está dependente, principalmente, do regime hidrológico e das características geo-morfológicas da bacia.

A superfície terrestre tal como a vemos hoje é o resultado da acção da água, da acção do vento (a uma menor escala), de acidentes tectónicos e da acção do homem.

A acção da água sobre o solo pode assumir duas formas distintas: a erosão, que se caracteriza por um processo lento mas continuado no tempo ou os movimentos de massa (fig.2.1) que sucedem de forma brusca, geralmente concentrada no tempo, e que estão, apesar de também relacionados com as condições da precipitação, mais fortemente relacionados com as condições geológicas e geotécnicas do terreno, Lencastre e Franco (2006).

O processo físico e geoquímico de decomposição das rochas, pelo qual se forma o esqueleto inorgânico do solo composto por uma camada de areia, silte e argila sobre a rocha mãe é denominado de meteorização.

Os materiais desagregados pelas diferentes acções da água no solo e subsolo são substituídos pela meteorização da rocha subjacente e pela matéria orgânica resultante da manta morta. Resulta assim um certo equilíbrio entre estes processos, podendo verificar-se a estabilidade dos solos, durante longos períodos. A figura 2.2 é representativa dos diversos processos intervenientes nesse balanço a que o solo está sujeito, Lencastre e Franco (2006).

É de senso comum que os solos constituídos por percentagens de argila e cálcio favoráveis, e com um teor de matéria orgânica elevado, apresentam um comportamento mais resistente à dispersão. Uma gota de água de massa “m” cai no solo com uma velocidade “v” e uma energia cinética correspondente

igual a $mv^2/2$, que é mobilizada, em grande parte, para levantar as partículas do solo. A cobertura vegetal absorve a energia cinética da chuva contribuindo para minimizar a energia desagregadora mobilizada, Lencastre e Franco (2006).

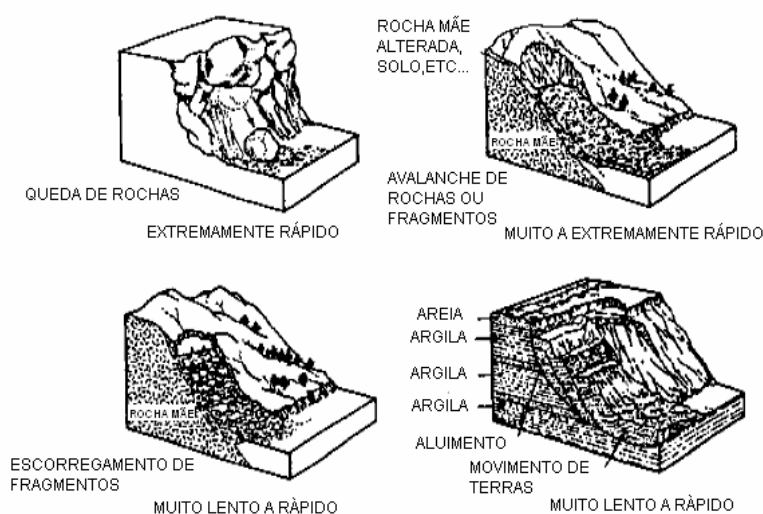


Fig.2.1 – Movimentos de massa (Lencastre e Franco (2006)).



Fig.2.2 – Balanço do solo no estado natural (Lencastre e Franco (2006)).

Uma utilização indevida do solo pelo Homem, pode acelerar a sua desagregação. Uma correcta exploração urge e é fundamental para evitar a sua degradação, uma rápida destruição e os consequentes inconvenientes, que se poderão fazer sentir, não só nas zonas onde o Homem actua directamente, como também a jusante destas, para onde os materiais são transportados.

Um escoamento superficial estabelece-se quando a intensidade da chuva se sobrepõe à capacidade de infiltração da água no solo. Os materiais levantados pelo impacto das gotas são transportados ao longo

das encostas por este escoamento que tem também um certo poder erosivo, tanto maior quanto maior for a altura da água e a inclinação do terreno.

Relativamente à erosão, uma encosta pode ser dividida em três zonas distintas: a zona superior onde a erosão pouco se faz sentir, uma zona intermédia onde se intensifica o escoamento superficial com grande poder erosivo e no final, uma zona de erosão decrescente com deposição de sedimentos, fig.2.3, Lencastre e Franco (2006).

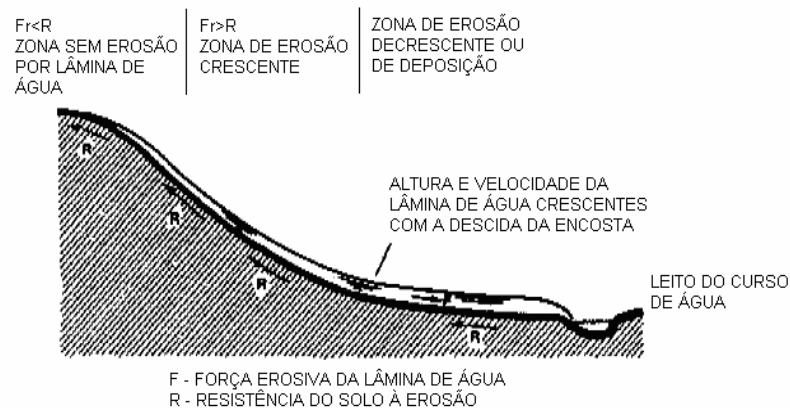


Fig.2.3 – Erosão de encosta (Lencastre e Franco (2006)).

O escoamento superficial processa-se de forma uniforme, designada por lâmina de água, até escolher caminhos vantajosos ao longo da encosta, concentrando-se e provocando uma erosão localizada mais intensa designada por erosão por sulcos. Esta última forma de erosão é, no entanto, quando comparada com a erosão por salpicos e por lâmina de água, a que desagrega menor quantidade de material, Lencastre e Franco, (2006).

Do material transportado pelo escoamento superficial, apenas uma parte atingirá as linhas de água, ficando o restante retido pelo percurso.

Nos cursos de água, os períodos em que as partículas se deslocam alternam com outros em que se mantêm paradas, muitas vezes debaixo de outras partículas que se deslocaram posteriormente. Aqui, o transporte de sedimentos pode ocorrer em suspensão na massa líquida ou por arrastamento junto ao leito, Lysne *et al.* (2003).

No transporte em suspensão as partículas sólidas são deslocadas no seio da água e tocam ocasionalmente o leito mas não tendem a depositar-se neste, a respectiva sustentação é devida às componentes verticais das forças de turbulência. As partículas são transportadas sensivelmente à mesma velocidade do escoamento.

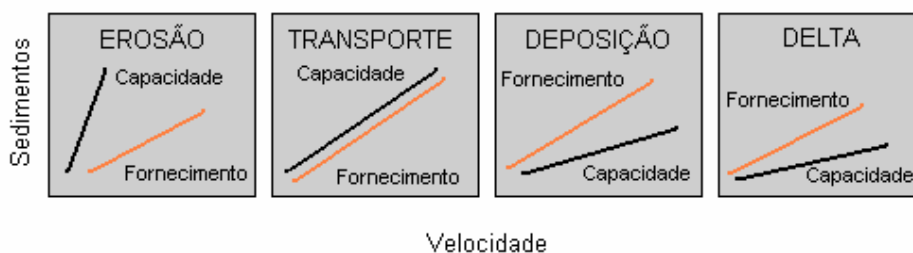
No transporte por arrastamento as partículas são deslocadas junto ao leito do rio deslizando, rolando, escorregando e contactando frequentemente com as partículas estáveis que constituem o leito. Neste transporte as partículas têm uma velocidade de deslocação irregular, com um valor médio muito inferior à velocidade do escoamento, Lysne *et al.* (2003).

A figura 2.4 representa as diversas formas de transporte de sedimentos. Por vezes não existe uma distinção nítida entre o transporte em suspensão e o transporte por arrastamento, pelo que, pode também ser considerado um transporte de características intermédias, o transporte por saltos, em que se vão alternando as fases de transporte por arrastamento com as fases de transporte em suspensão, Lencastre e Franco (2006).



Fig.2.4 – Movimento das partículas (Lencastre e Franco (2006)).

A erosão, o transporte e a deposição variam ao longo do curso de água, em função das condições locais. A capacidade de transporte muda com a inclinação do leito e o caudal, no entanto, o transporte efectivo pode estar limitado pela quantidade local de sedimentos transportáveis fornecidos. A figura 2.5 apresenta esquematicamente os quatro processos típicos que poderão caracterizar as secções dum curso de água desde a nascente até à foz, Lysne *et al.* (2003).

Fig.2.5 – Classificação dos diversos troços de um curso de água relativamente ao transporte de sedimentos (adaptado de Lysne *et al.*, (2003)).

Erosão: Enquanto o rio puder transportar mais sedimentos do que a bacia associada pode fornecer, o escoamento na linha de água terá energia suficiente para continuar a escavar o próprio leito. As rochas que geralmente constituem o leito do rio nestas zonas controlam a forma deste e a sua inclinação.

Transporte: A capacidade de transporte do rio iguala o abastecimento de sedimentos pela bacia. Todos os novos sedimentos que chegam são imediatamente transportados e o rio apresenta um leito estável.

Deposição: O rio não consegue transportar todo o material que é fornecido pela bacia. O material que não é transportado deposita-se formando canais e ilhas. O leito do rio é instável e terá tendência para subir de nível.

Desenvolvimento de deltas: A capacidade de transporte é baixa comparada com o abastecimento. A deposição de sedimentos contrai o canal do rio e desenvolvem-se novos canais (suplementares ou substituintes). Este processo ocorre geralmente na foz do rio que assume a forma de leque ou triângulo (a forma da letra grega maiúscula com o mesmo nome (Δ), fig.2.6, Lysne *et al.* (2003).

As quatro condições descritas anteriormente deverão ocorrer consecutivamente desde a nascente até à foz. Observando a figura 2.7, esperar-se-ia encontrar erosão na secção B-B', transporte na zona

ramificada e deposição a jusante da zona ramificada até ao delta. Em muitos casos, contudo, poderão ser encontrados troços intermédios com erosão e deposição assim como formação de deltas, Lysne *et al.* (2003).



Fig.2.6 – Delta do Nilo (http://www.sanasa.com.br/noticias/not_con3.asp?par_nrod=555&flag=TK-2).

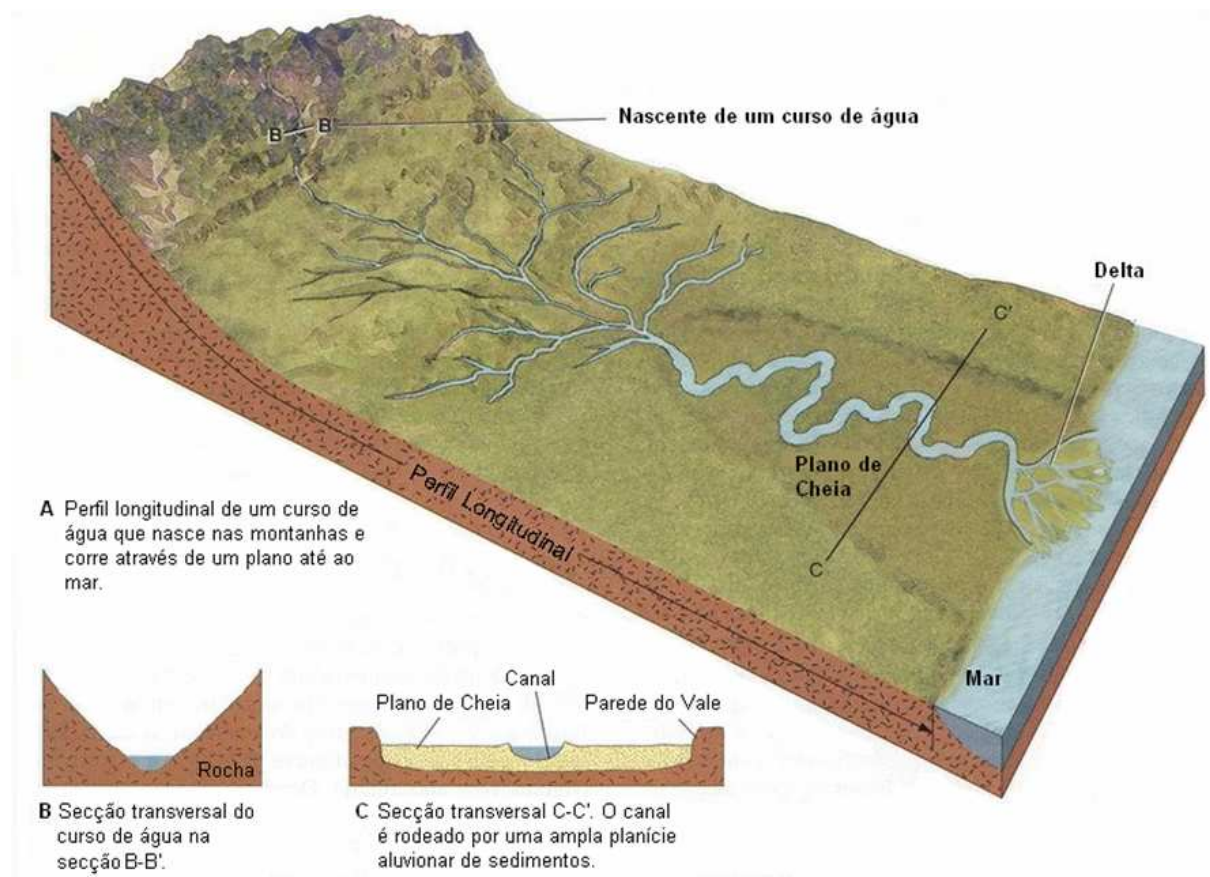


Fig.2.7 – Perfil Longitudinal de um curso de água (adaptado de http://sites.google.com/site/geologiaebiologia/_/rsrc/1219775711387/Home/geologia-problemas-e-materiais-do-quotidiano/bacias-hidrogr%C3%A1ficas/).

As condições existentes num dado curso de água podem ser modificadas, por vezes, por obras que não têm sequer essa finalidade. A construção de uma barragem modifica as condições de transporte de sedimentos, representando, usualmente, uma quebra na repetição da sequência normal, com formação de deltas na extremidade a montante da albufeira, assoreamento desta e erosão a seguir à restituição, Lysne *et al.* (2003). No dimensionamento de uma albufeira de regularização é, assim, necessário

reservar espaço para a deposição de sedimentos, o volume morto da albufeira, que é determinado em função do regime de transporte sólido do rio e da vida útil da obra, Lencastre e Franco (2006). A figura 2.8 ilustra a erosão prevista para o troço a jusante de uma barragem proposta para Stiegler's Gorge na Tanzânia.

Numa albufeira a deposição dos sedimentos é feita em função das dimensões das partículas sedimentares. Tipicamente, as partículas maiores em suspensão e a maior parte das transportadas por arrastamento formam um delta à entrada da albufeira, quando a velocidade da corrente diminui. Os sedimentos mais finos em suspensão depositam em frente do delta e contribuem para a elevação do fundo da albufeira. As partículas ainda mais finas podem até continuar a ser transportadas pela corrente e transpor a barragem para jusante. Na figura 2.9 esquematiza-se a referida forma de deposição de sedimentos, Lysne *et al.* (2003).

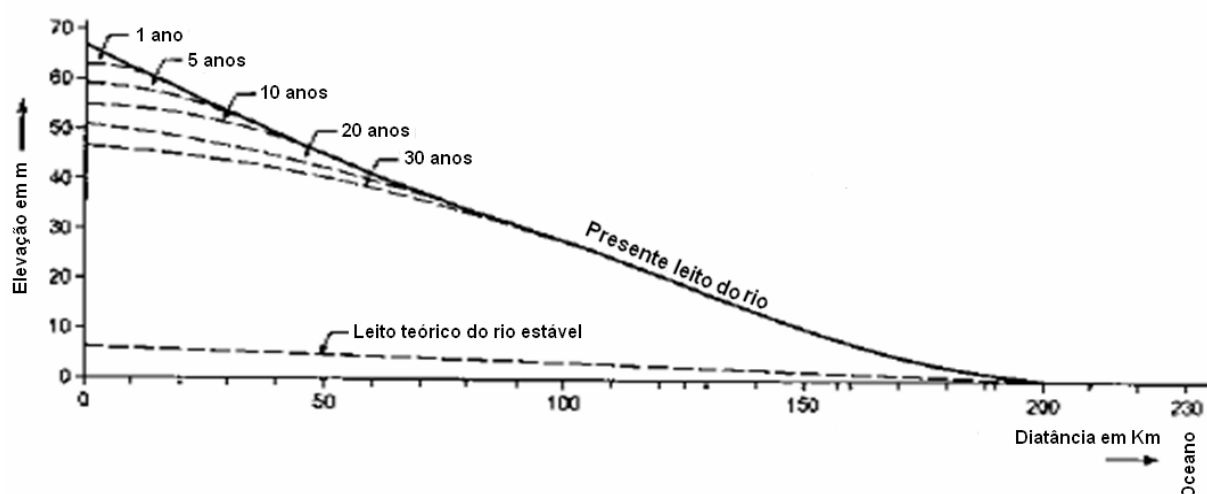


Fig.2.8 – Previsão da erosão a jusante de uma barragem proposta para a Stiegler's Gorge, Tanzânia (adaptado de Lysne *et al.* (2003)).



Fig.2.9 – Padrão típico de deposição dos sedimentos nas albufeiras (adaptado de http://www.dha.lnec.pt/nre/english/projects/sedim_eng.html)

Desta forma, a deposição da maioria dos sedimentos ocorre na albufeira a montante no volume de armazenamento útil e não no volume morto (volume abaixo da cota mínima da tomada de água). Na albufeira Tarbela, no Paquistão, depois de 6 anos de operação, 44 % dos sedimentos estavam depositados no volume de armazenamento útil, enquanto 78 % do volume morto estava ainda disponível (Mahamood, 1987). Na barragem Gariep, na África do Sul, a albufeira perdeu 10 % da sua capacidade original em menos de 20 anos de operação, com 88 % dos sedimentos localizados na zona de armazenamento útil. Na barragem High Aswan, no Egipto, os depósitos de sedimentos eram 2 km³, dos quais 50 % estavam localizados na zona de armazenamento útil e a albufeira possui um volume morto de 31 km³, Basson e Rooseboom (1999).

Após a deposição, os materiais grosseiros apresentam muito maior estabilidade, com a manutenção das suas características no tempo e com uma difícil movimentação posterior. Pelo contrário, os depósitos de sedimentos finos apresentam uma evolução nas suas propriedades, sofrendo compactação ao longo do tempo, podendo as camadas superficiais ser colocadas novamente em suspensão, muito mais facilmente.

A diferença de comportamento das diferentes fracções granulométricas é muito importante no que diz respeito à qualidade da água. A fracção arenosa é inerte no que diz respeito aos fenómenos químico-biológicos e movimenta-se no fundo da albufeira de montante para jusante. Pelo contrário, a fracção fina, especialmente a argilosa, pode apresentar comportamentos químico-biológicos muito distintos, em função da composição mineralógica das partículas e das propriedades da água dos rios afluentes e da albufeira, pode residir em suspensão por prolongados períodos, e deposita-se em extensas camadas horizontais por toda a albufeira. A sua nova entrada em suspensão pode originar a introdução na água da albufeira de matérias químicas nocivas bastante tempo depois da sua entrada inicial na albufeira, em que essas matérias se mantinham confinadas apenas aos materiais sólidos a que estavam agregadas, Rocha (1998).

O esquema da figura 2.10 esquematiza o balanço de entrada e saída de sedimentos numa albufeira.

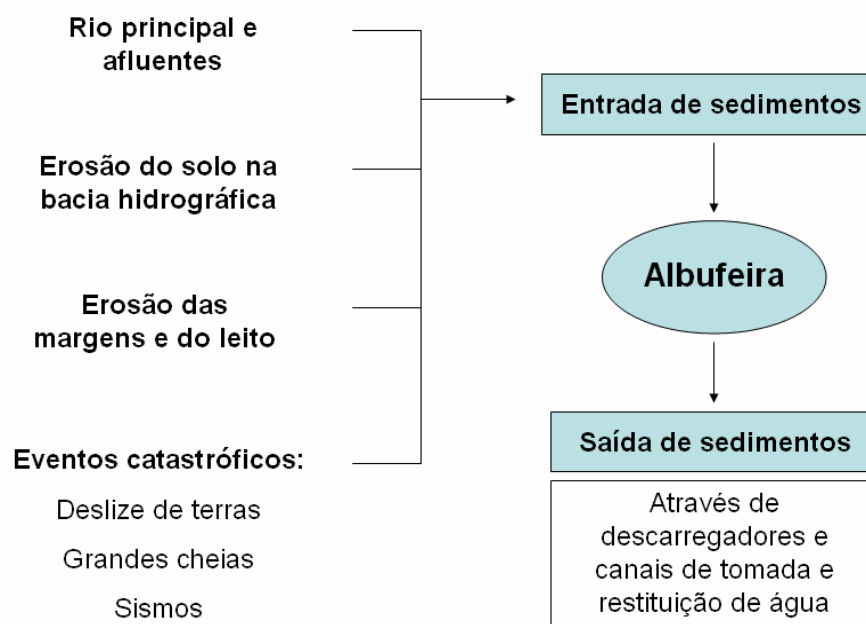


Fig.2.10 – Balanço de sedimentos numa albufeira (adaptado de Bатуca e Jordaan (2000)).

2.2. CASOS INTERNACIONAIS

2.2.1. INTRODUÇÃO

A sedimentação nas albufeiras agrava-se, de forma geral, com o tempo de existência das mesmas, o que é facilmente compreendido já que o transporte de sedimentos é um processo contínuo e a grande maioria das partículas é retida pela estrutura da barragem.

A figura 2.11 mostra o número de barragens que foram construídas em todo o mundo por década. Observando o gráfico pode concluir-se que, no mundo, a década de 1970 corresponde ao grande pico na construção destas estruturas.

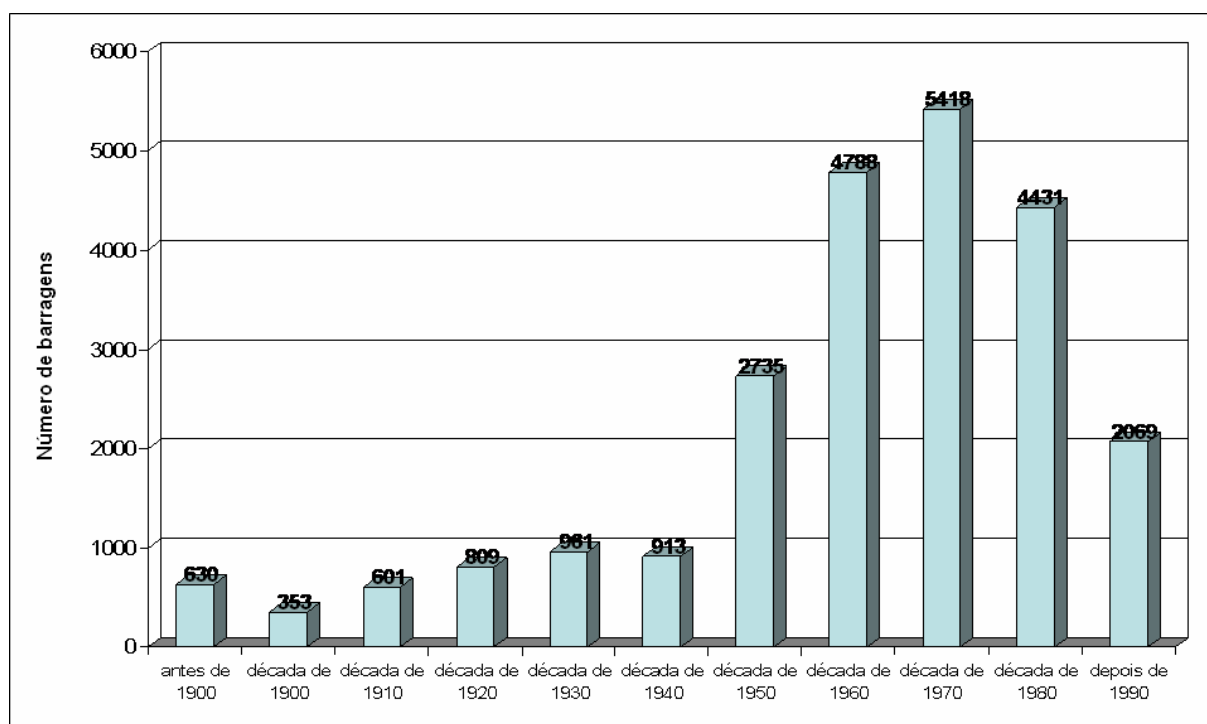


Fig.2.11 – Construção de barragens por década no mundo (adaptado de Molino, (2003)).

O número de barragens construídas por década somente na Europa está representada na figura 2.12. Comparando este gráfico com o anterior (fig.2.11) verifica-se que o pico na construção de barragens na Europa foi atingido 10 anos antes de ter sido atingido em todo o mundo, em 1960, o que pode explicar que hoje, na Europa, a preocupação com a perda de capacidade das albufeiras seja mais acentuada do que no resto do mundo, Molino (2003).

A análise da distribuição global do volume de armazenamento das albufeiras (fig.2.13) permite concluir que a grande parte das albufeiras existentes apresentam um volume de armazenamento inferior a 100 milhões de m³, pelo que, a análise do problema da sedimentação deverá ter em atenção especialmente as pequenas e médias barragens, pois, para além de serem mais numerosas serão, à partida, as primeiras a perder totalmente a sua capacidade.

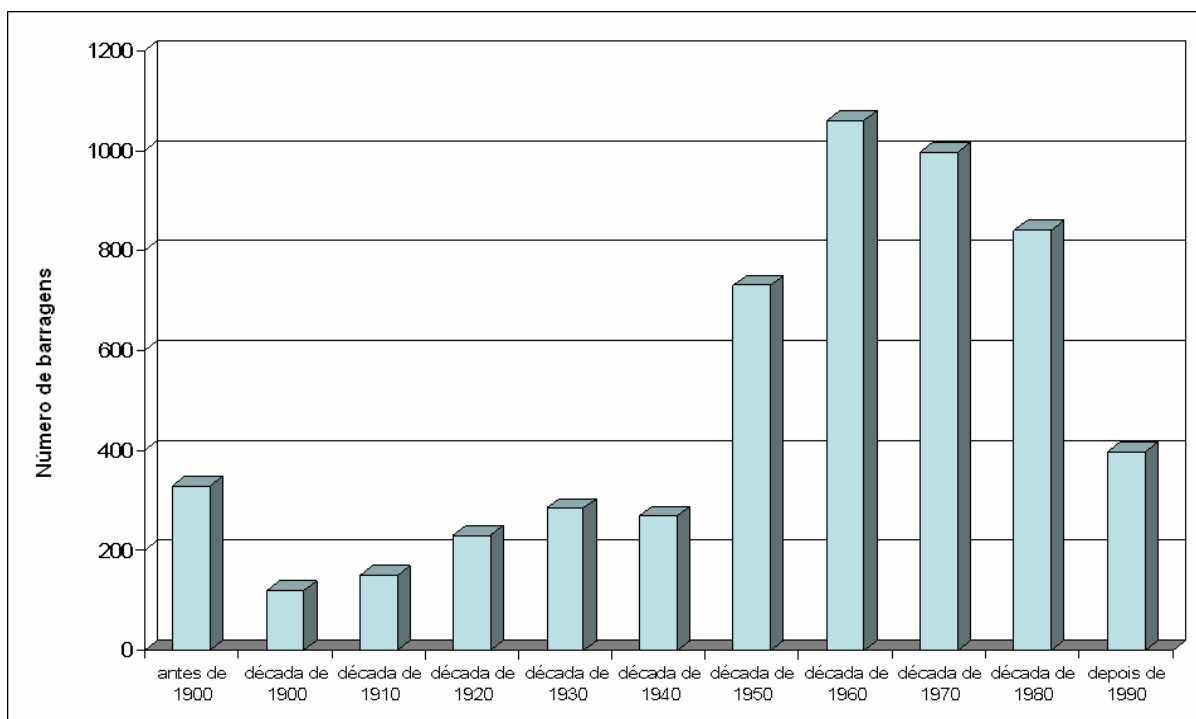


Fig.2.12 – Construção de barragens por década na Europa (adaptado de Molino, (2003)).

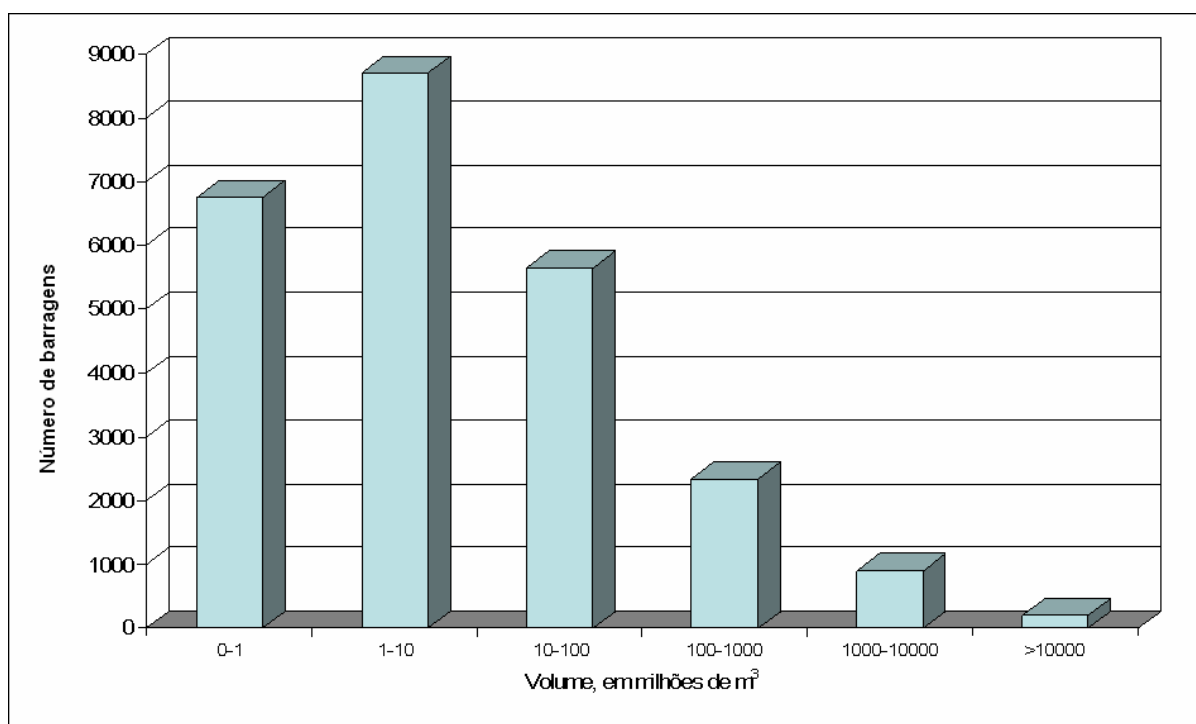


Fig.2.13 – Distribuição global do volume de armazenamento das albufeiras (adaptado de Molino (2003)).

A perda de volume total de reserva de água das albufeiras devido à sedimentação, em todo o mundo, está estimada em 1 %. Isto é, numa escala global, cerca de 50 000 milhões de m³ de capacidade tem sido perdida para os sedimentos todos os anos. No entanto esta estimativa global tem pouco

significado, pois, o problema da deposição dos sedimentos é condicionado por diversas variáveis locais e, portanto, a sua dimensão varia muito de uma situação para outra, como se comprova com a figura 2.14 que apresenta a perda de capacidade de armazenamento de água relativamente à idade de 47 barragens diferentes. Pode então concluir-se, pelo diagrama, que não existe nenhuma correlação directa entre a perda de capacidade de armazenamento de água e a idade das barragens, Molino (2003).

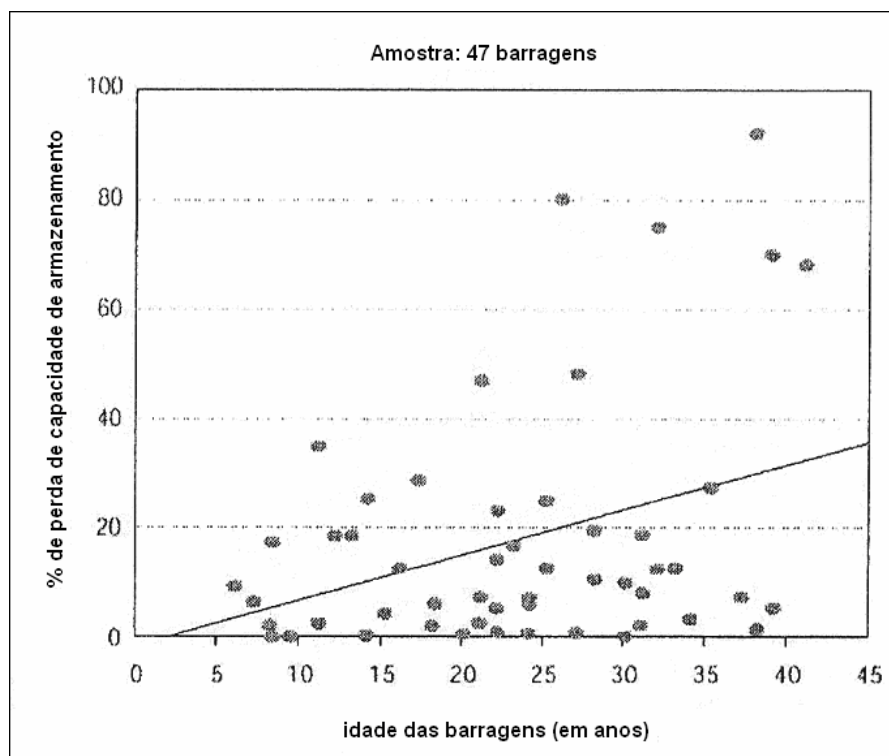


Fig.2.14 – Relação entre a idade das barragens e a perda de capacidade de armazenamento ((ICOLD, 1998) adaptado de Molino, (2003)).

A albufeira Farhad no rio Syr Daria com uma capacidade original de 265 milhões de m^3 foi quase completamente sedimentada (96 %) em 10 anos. A albufeira Orto-Tocoi no rio Ciu em Kirghistan, com uma capacidade de armazenamento inicial de 470 milhões de m^3 , estava sedimentada em 0,4 % (2 hm^3) em 11 anos de operação, Artamanov e Grebenicicov (1970), por Batuca e Jordaan (2000).

Está estimado, que o custo anual de substituição da capacidade perdida para a sedimentação em todo o mundo é de cerca de 4 500 milhões de euros (Mahmood, (1987), por Batuca e Jordaan (2000). De facto a sedimentação de albufeiras pode ocorrer nas mais diversas regiões geográficas do mundo, com as mais diversas condições climáticas, Batuca e Jordaan (2000).

Nas figuras 2.15 e 2.16 estão representadas as distribuições mundiais de sedimentos transportados pelos rios (admitindo o transporte por arrastamento igual a 20 % do transporte em suspensão) e de precipitação, respectivamente, permitindo concluir que Portugal apresenta em média concentrações de sedimentos relativamente baixas e valores de precipitação entre 50 e 800 mm por ano.

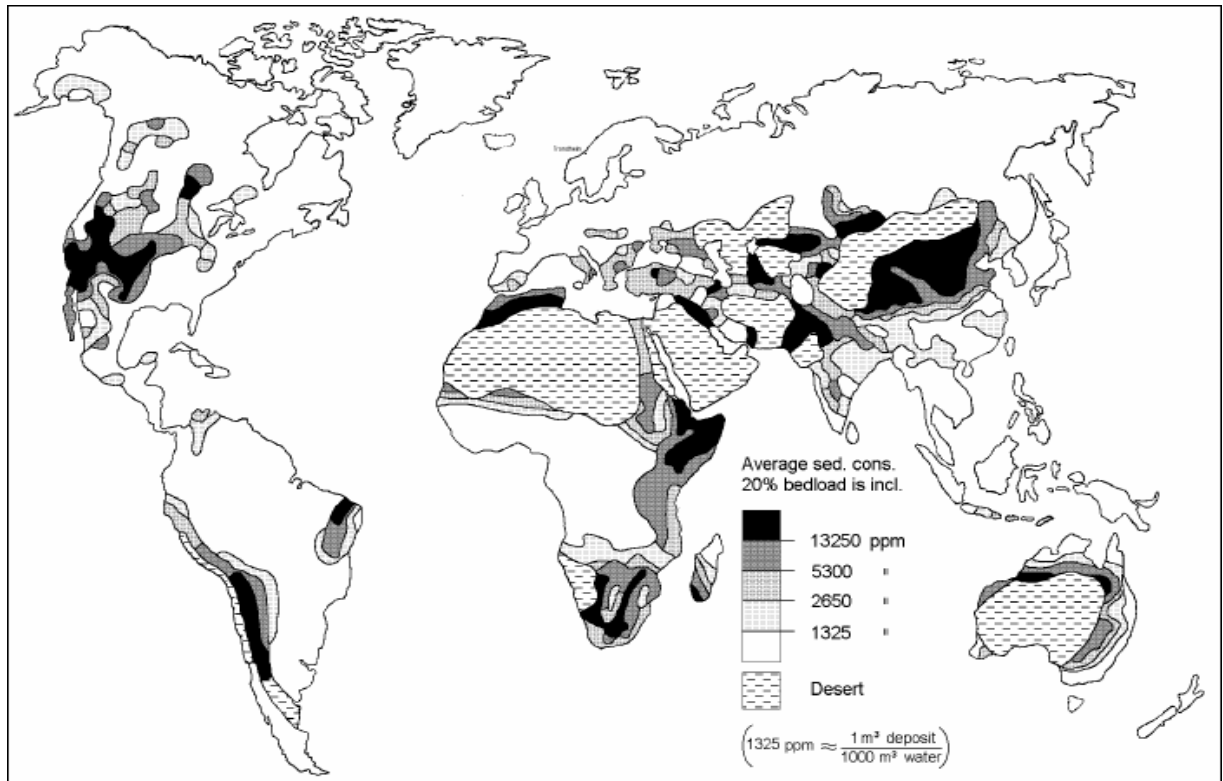


Fig.2.15 – Distribuição mundial de sedimentos (Støle (2008)).

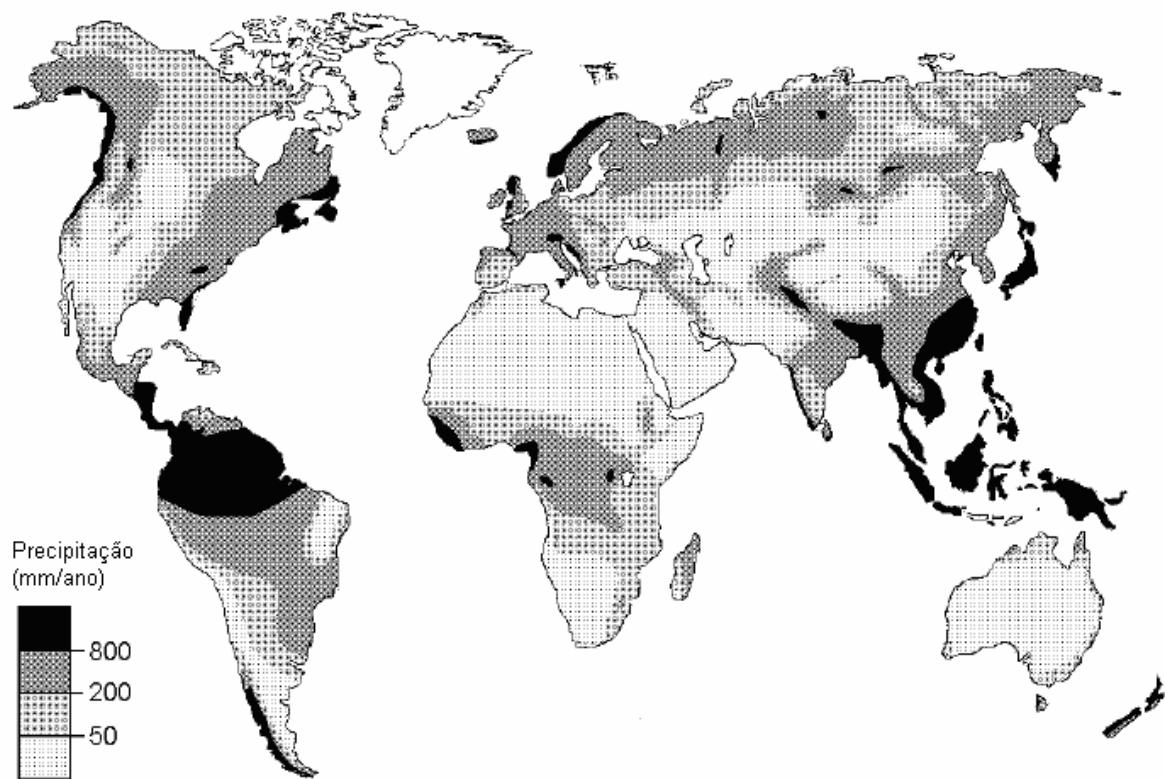


Fig.2.16 – Distribuição mundial de precipitação (Støle (2008)).

De várias albufeiras dramaticamente sedimentados, reportadas em vários países do mundo, são apresentados de seguida alguns exemplos, comprovando a real existência do problema e a dimensão que, por vezes, pode assumir. Estes exemplos revestem-se de grande importância para a perfeita compreensão do problema em análise e dos processos de sedimentação, servindo, por isso, de inspiração ao estudo da mesma problemática em Portugal.

2.2.2. HIMALAIAS

Os rios dos Himalaias são a base para a vida humana e para as suas actividades locais, assumindo o papel principal em contextos culturais, económicos e políticos. Os mesmos rios representam, um dos maiores desafios no desenvolvimento dos recursos de água. Aqui, o transporte de sedimentos é de uma natureza extremamente complexa, com padrões de transporte de sedimentos que variam de rio para rio e até de troço para troço ao longo de um rio. Os rios atravessam todas as possíveis condições climatológicas e topográficas, desde o alto dos Himalaias onde os glaciares se transformam em torrentes de água, passando pelo rio montanhoso de leito rochoso até ao rio de leito em cascalho antes de correr mais lentamente num leito de areia e silte.

O conhecimento dos volumes de sedimentos transportados nos rios dos Himalaias é escasso. Não existem dados de longo termo, os caudais de cheia são usualmente perdidos durante a medição e o transporte por arrastamento junto ao leito não é de todo medido (assume-se ser 10-20 % dos sedimentos em suspensão). As estações de medição nos rios são raras e a maioria das que existem não medem sedimentos. Um pico de sedimentos transportado pode facilmente passar despercebido por uma estação de medição do rio. Grande parte das principais cheias resulta de chuvadas prolongadas e deslize de terras, provocando grandes correntes com concentrações extremas de sedimentos a jusante. Na figura 2.17 apresentam-se as concentrações de sedimentos e os caudais observados no rio Kali Gandaki no Nepal. Concentrações de sedimentos tão grandes como 25000 ppm são regularmente detectadas nos principais rios, Støle (1993).

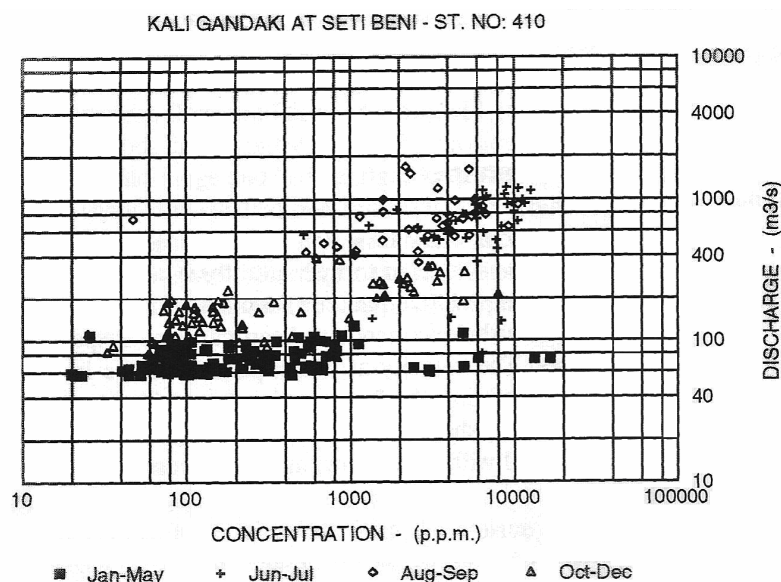


Fig.2.17 – Concentração de sedimentos e caudais observados no rio Kali Gandaki, Nepal 1986 (Støle (1993)).

Nos rios das montanhas, onde o leito é dominado por cascalho e rochedos, as fórmulas hidráulicas comumente aplicadas não traduzem adequadamente os movimentos junto ao leito. Mais a jusante, quando o leito do rio é de areia e silte, a profundidade dos rios, resultante da erosão da corrente, excede frequentemente 5 m tendo já sido registado cerca de 20 m, Carson (1985), por Støle, (1993).

O grave risco de sedimentação das albufeiras indianas e o seu impacto na comunidade reclama um imediato inventário da magnitude dos estragos para todas as albufeiras, a fim de encontrar antecipadamente adequadas medidas correctivas. As inspecções de capacidade das albufeiras levadas a cabo sistematicamente permitiram concluir que a velocidade de sedimentação por unidade de área de bacia tem sido 2 a 3 vezes superior ao que foi assumido aquando do projecto. Mapas de inspecção aérea de algumas bacias de rios em vales mostram a formação de ravinas de 60 metros de comprimento não existentes nos mapas desenhados 30 anos antes. Estas constatações reflectem as mudanças rápidas que tiveram lugar nas bacias hidrográficas com grande taxa de erosão do solo, reclamando medidas rápidas de controlo da erosão induzida pelo Homem nas bacias, Varma *et al.* (1992), por Støle (1993).

Um estudo de avaliação do transporte de sedimentos realizado no rio Godavari, que é um dos rios mais importantes da Índia, revela as consequências que pode ter um programa de amostragem pouco exaustivo. Com base em amostragens ocasionais, durante as várias estações do ano e durante, um período de três anos, foi calculada uma concentração média de sedimentos em suspensão de 770 mg/l. A CWC (*Central Water Commission*), com base nas amostras diárias de um ano, elevou a mesma concentração para 1 525 mg/l, enquanto que, em 10 anos de observações diárias a concentração média real foi de 1 845 mg/l. Neste caso, os sedimentos em suspensão anuais foram subestimados em cerca de 140%. Este erro tem obviamente graves implicações no cálculo da vida útil da albufeira.

Na estação das chuvas, a contribuição de poucos dias de correntes anormalmente elevadas pode ser desproporcionalmente grande. No Godavari foram observados valores de 5 a 9% dos sedimentos anuais a serem transportados por dia e valores até 64% que poderiam resultar da corrente de um único mês, Biksham e Subramanian, (1988) por Støle, (1993).

Aproveitamentos a fio-de-água, que deixem passar os sedimentos para jusante, e grandes barragens, com capacidade para reservar os sedimentos durante o período de vida previsto, são, hoje, os únicos projectos de aproveitamentos hidráulicos viáveis em bacias de rios com transporte significativo de sedimentos. O fenómeno da sedimentação exclui assim a possibilidade da construção de albufeiras com tamanho intermédio para regulação a longo termo, pois estas albufeiras correriam o risco de ficar completamente sedimentados, apenas, com uma cheia mais forte. De onde se conclui que as abordagens de desenvolvimento de aproveitamentos hidráulicos em rios com acentuado transporte de sedimentos deverão ter como preocupação fundamental facilitar a passagem dos sedimentos pela barragem. A protecção do solo contra a erosão e melhoramento dos padrões de uso do solo são também essenciais, a fim de proteger a terra e os recursos de água e permitir, às pessoas, o uso destes recursos. Contudo o transporte de sedimentos é e continuará a ser um fenómeno natural nos Himalaias. É importante proteger as florestas e plantar árvores, o que, na maioria dos casos, irá reduzir a produção de sedimentos, mas este processo geomorfológico não irá parar. Sistemas fiáveis e eficazes de controlo e remoção de sedimentos serão, assim, sempre necessários para uma bem sucedida utilização dos recursos de água nos Himalaias e outras regiões similares, Støle (1992).

2.2.3. RIO AMARELO

O rio Amarelo é o segundo maior rio da China (5 464 km) com uma bacia hidrográfica de 752 000 km². Como mostra a figura 2.18, o rio Amarelo atravessa a vasta planície de loess até ao mar Bohai. A produção anual de sedimentos da planície de loess, com uma área de 490 000 km², é de mais de 10 000 toneladas por km². Uma grande parte dos sedimentos produzidos pela erosão é transportada pelo rio Amarelo, sendo, assim, este rio o que possui as mais elevadas concentrações de sedimentos do mundo. A média anual de sedimentos transportados pelo rio antes de 1980 era de 1 600 milhões de toneladas. A concentração média de sedimentos é 35 kg/m³ e a maior registada foi de 911 kg/m³. O rácio entre a mais alta e a mais baixa precipitação anual é de 3,4, enquanto o rácio entre a mais alta e a mais baixa concentração de sedimentos anual é de 10. Mais de 60 % da água e 85 % dos sedimentos são transportados na estação das chuvas de Julho a Outubro. O leito na parte inferior do rio tem sido desde a década de 1980 consecutivamente elevado a uma taxa de cerca de 10 cm por ano. O presente leito do rio é 10 metros mais alto do que a terra circundante, o que faz do rio um canal empoleirado, pondo em perigo a segurança das comunidades e terrenos de ambos os lados da parte inferior do rio, Wang (2003).

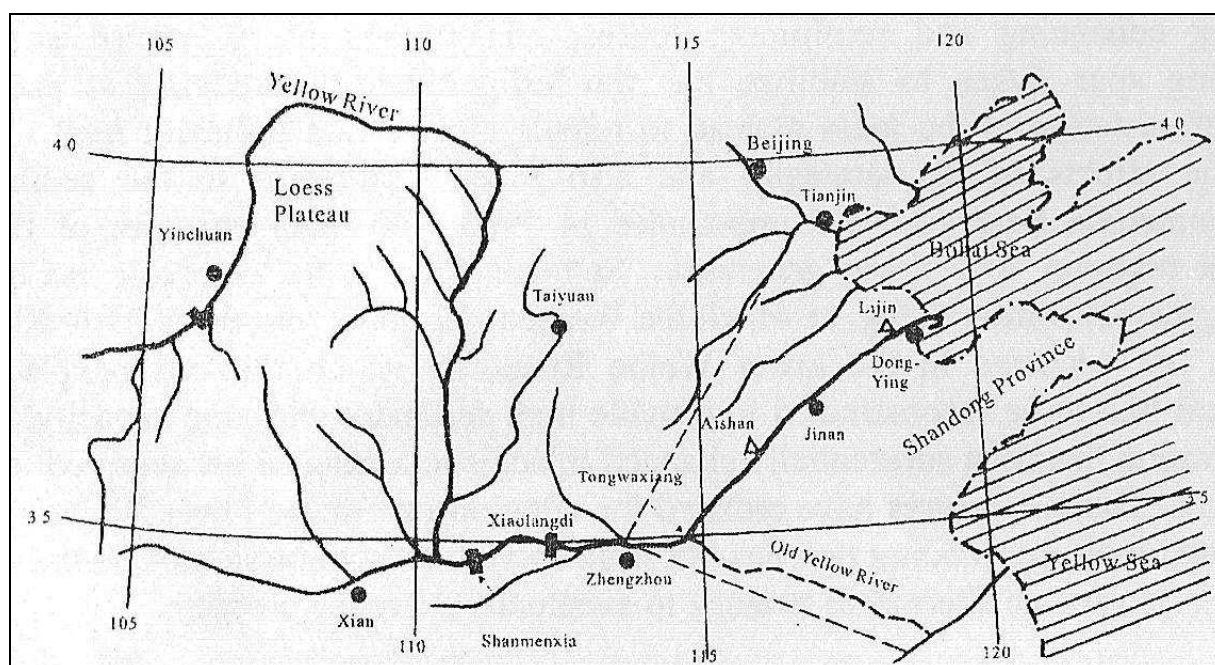


Fig.2.18 – O rio Amarelo e parte do seu delta (Wang (2003)).

Os sedimentos no leito do rio e no plano de cheia são, sobretudo, compostos por silte com diâmetro médio igual a cerca de 0.03 mm, que são facilmente suspensos, não se conseguindo detectar transporte por arrastamento junto ao leito. Desta forma, a erosão do leito do rio pode atingir mais de 10 m em somente 24 horas, o que torna o canal muito instável, Wan e Wang (1994), por Wang, (2003). Esta característica faz da parte inferior do rio Amarelo um rio nómada, pois este altera o seu curso diversas vezes, num fenómeno denominado por avulsão, Wang (2003).

De 1128 a 1855 o rio correu para o mar Amarelo. Em 18 de Junho de 1855, uma cheia de montante foi amplificada por uma forte precipitação na parte inferior do rio e o grande muro de regularização foi galgado em Tong-wa-xiang (uma curva do rio que se pode ver na figura 2.15). O rio alcançou e inundou 8 municípios e pirateou o canal do rio Daqing, alterando, assim, o seu maior curso de sul para

norte passando a correr para o mar Bohai. Milhares de pessoas foram mortas pela cheia e alguns milhões perderam os seus abrigos e terrenos.

Em 1933, o rio foi sujeito novamente a uma forte precipitação, de 5 a 10 de Agosto. Registou-se o caudal máximo de 22 000 m³/s na albufeira de Sanmenxia (ver fig.2.15). A cheia inundou 67 municípios, numa área total de 8 637 km², e matou 18 293 pessoas. Em 9 de Junho de 1938 o muro de regularização em Huayuankou (Zhengzhou) foi quebrado pelo exército chinês numa tentativa de parar a invasão do exército japonês. O rio esvaziou-se, inundando uma área de cerca de 50 000 km² e atingiu o canal do rio Huaihe alterando, o seu curso principal no norte para o sul, para o mar Amarelo (fig.2.19). Mais de 890 000 pessoas morreram e 3,9 milhões de pessoas perderam os seus abrigos e terrenos. O rio correu, no leito de cheia, sem qualquer canal fixo nem muros de regularização, entre os canais dos rios Amarelo e Huaihe, durante 8 anos. O rio arrastou, durante este período, cerca de 10 000 milhões de toneladas de sedimentos, criando a famosa área inundada de Huangfan, com 54 000 km². A abertura foi finalmente reparada em 1946, implicando uma nova troca do seu curso, voltando a correr, até hoje, para o mar Bohai, Wang (2003).

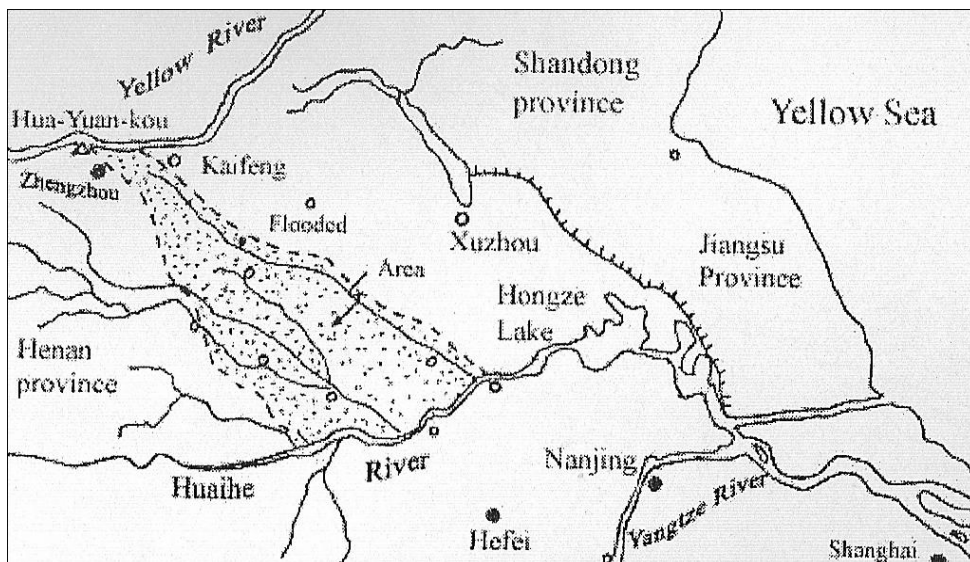


Fig.2.19 – Representação da cheia provocada pelo exército chinês em 1938 em Huayuankou (Wang (2003)).

Avulsões são o resultado inevitável da deposição no rio, estando, por isso, intimamente relacionadas com a carga de sedimentos que o rio carrega. O rio Amarelo tem sido o rio com avulsões mais frequentes no mundo. Desde 600 a.c. o rio mudou 26 vezes o seu curso principal (numa extensão de cerca de 600 km da foz do rio) descarregando sedimentos, tendo já criado mais de 250 000 km² de terra fértil, que é uma grande riqueza da nação Chinesa onde cerca de 150 milhões de pessoas habitam. A figura 2.20 mostra que o rio Amarelo varreu todo o plano norte da china e deixou numerosos canais.

O canal não é instável somente na zona estuarina, mas também na zona próxima de Zhengzhou porque tanto a taxa de sedimentação como a de erosão são elevadas. A largura do vale do rio é 5-20 km definida por muros de regularização construídos pelo Homem. O facto de ser um rio largo confere-lhe capacidade para retenção de água e propicia a deposição de sedimentos. O canal pode migrar devido à erosão de um lado e à deposição de outro, dentro dos limites do grande muro de regularização, Wang e Wu (2001), por Wang (2003). Por vezes o rio move-se directamente na direcção das paredes do muro pondo em perigo a sua segurança. Pan Jixun propôs estreitar o rio a fim de elevar a velocidade e

manter elevada a capacidade de transporte, prevenindo a deposição e até promovendo a erosão dos sedimentos do leito, tornando assim o rio relativamente estável.

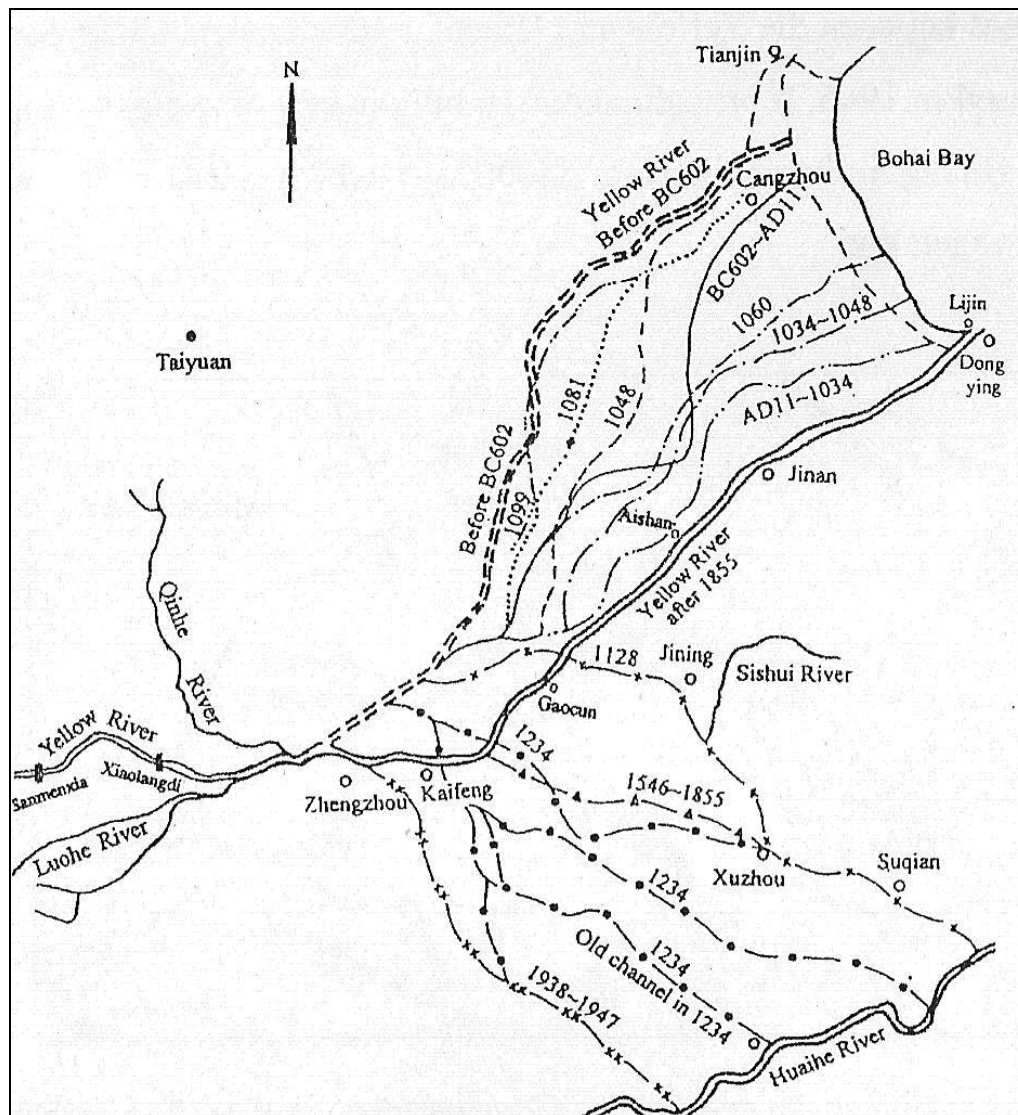


Fig.2.20 – Representação dos diversos canais criados pelas avulsões do rio Amarelo (Wang (2003)).

Foram construídas onze barragens no rio Amarelo desde 1957 a 2002. A capacidade total das albufeiras é 55 800 milhões de m^3 , igual à precipitação anual de toda a bacia hidrográfica. A maior parte das cheias oriundas das bacias hidrográficas dos trechos superiores e médios do rio Amarelo podem ser controladas com estas albufeiras.

Mais de 10 000 milhões de toneladas de sedimentos têm sido retidos pelas barragens, reduzindo a quantidade total de sedimentos depositados ao longo do rio Amarelo. A barragem de Xiaolangdi, em especial, foi construída com o propósito de reter sedimentos e controlar a sedimentação do baixo rio Amarelo. A capacidade total da albufeira de Xiaolangdi é 12 000 milhões de m^3 e a capacidade de retenção de sedimentos é 7 000 milhões de m^3 . Está previsto que os sedimentos da planície de loess podem ser retidos pela albufeira pelo menos 20 anos e por isso o baixo rio Amarelo sofrerá erosão a jusante, reduzindo o risco de cheia. Foi calculado que 300 milhões de toneladas de sedimentos dos trechos inferiores do canal serão levados pela água descarregada e transportados até ao oceano, nos

primeiros 8 anos. Esta albufeira tem também sido utilizada, pelo Homem, para criar cheias, com vista à erosão do leito do troço inferior do rio. A 4 de Julho de 2002 realizou-se a primeira experiência de cheia artificial criada com a albufeira de Xiaolangdi. A cheia, com uma descarga de pico de cerca de $2600 \text{ m}^3/\text{s}$, foi mantida durante 10 dias. A concentração de sedimentos foi de $10\text{--}20 \text{ kg por m}^3$. A cheia provocou a erosão do leito do canal do rio e a concentração média de carga suspensa aumentou, de menos de 20 kg/m^3 para 30 kg/m^3 . A experiência provou que a cheia artificial pode ser usada como estratégia alternativa para o controlo da sedimentação, Wang (2003).

As dragagens têm sido também empregues para mitigar a sedimentação. Um teste de dragagem foi conduzido num troço de 11 km de comprimento de Janeiro a Maio 1998. Foi cavada uma vala com 11 km de comprimento, 200 m de largura e 2,5 m de profundidade no leito do rio quase plano e foram dragados 5.48 milhões de m^3 de sedimentos e posteriormente transportados para fora do muro de regularização, tornando o muro mais largo e forte. Todavia, depois da primeira cheia do ano a vala estava praticamente preenchida pela deposição de novos sedimentos. A estratégia de dragar o canal do rio como solução geral para a sedimentação do canal não é a mais optimista.

A reflorestação da planície de loess é uma estratégia a longo termo para reduzir a sedimentação do rio. A estratégia tem sido empregue com sucesso em muitas bacias hidrográficas pequenas (com menos que 100 km^2 de área). As pequenas barragens para a retenção de sedimentos afectam a carga de sedimentos do rio de forma mais directa. Os agricultores constroem estas barragens encorajados pelo governo para criar terrenos agrícolas. A figura 2.21 mostra a precipitação e a variação anual da carga de sedimentos transportados para Lijin, no baixo rio Amarelo. A média anual de sedimentos transportados foi cerca de 1 000 milhões de toneladas antes de 1985 e desde então reduziu-se em 50 %. Estima-se que a redução de cerca de 300 milhões de toneladas de sedimentos se deve à reflorestação e às pequenas barragens de retenção de sedimentos construídas na planície de loess, Wang (2003).

A barragem de Sanmenxia, com 105 metros de altura e 739 metros de comprimento, com uma capacidade de reserva de projecto de 35 400 milhões de m^3 e um nível de pleno armazenamento de 350 m, é a primeira grande barragem no rio Amarelo, construída em 1960. A barragem controla uma bacia hidrográfica de $688\,000 \text{ km}^2$ e 89 % da precipitação total da bacia do rio Amarelo. Os principais propósitos da barragem são o controlo das cheias, a retenção de sedimentos para reduzir a sedimentação no canal a jusante da barragem, a geração de electricidade e a irrigação, figura 2.22.

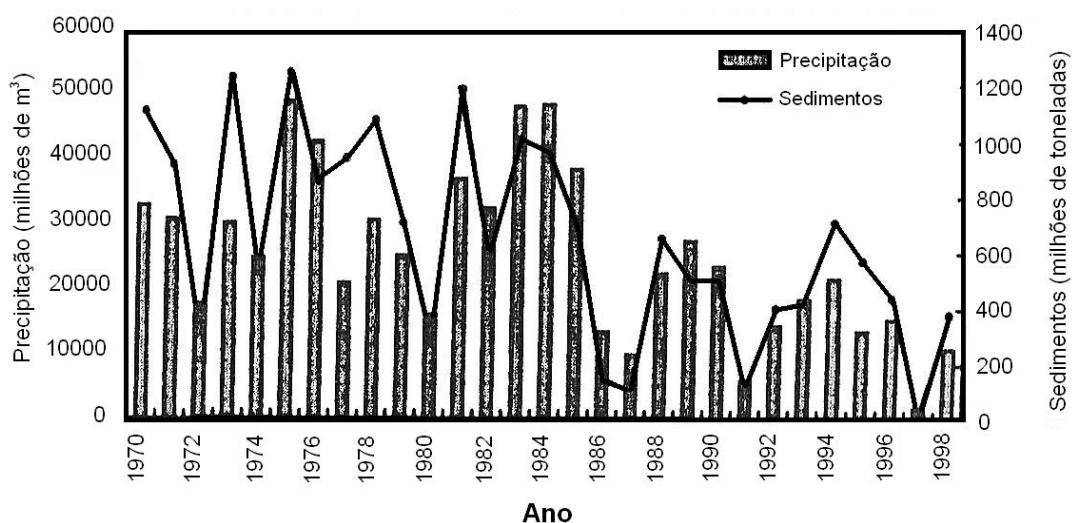


Fig.2.21 – Variação da precipitação e da carga sedimentar do baixo rio Amarelo (adaptado de Wang (2003)).

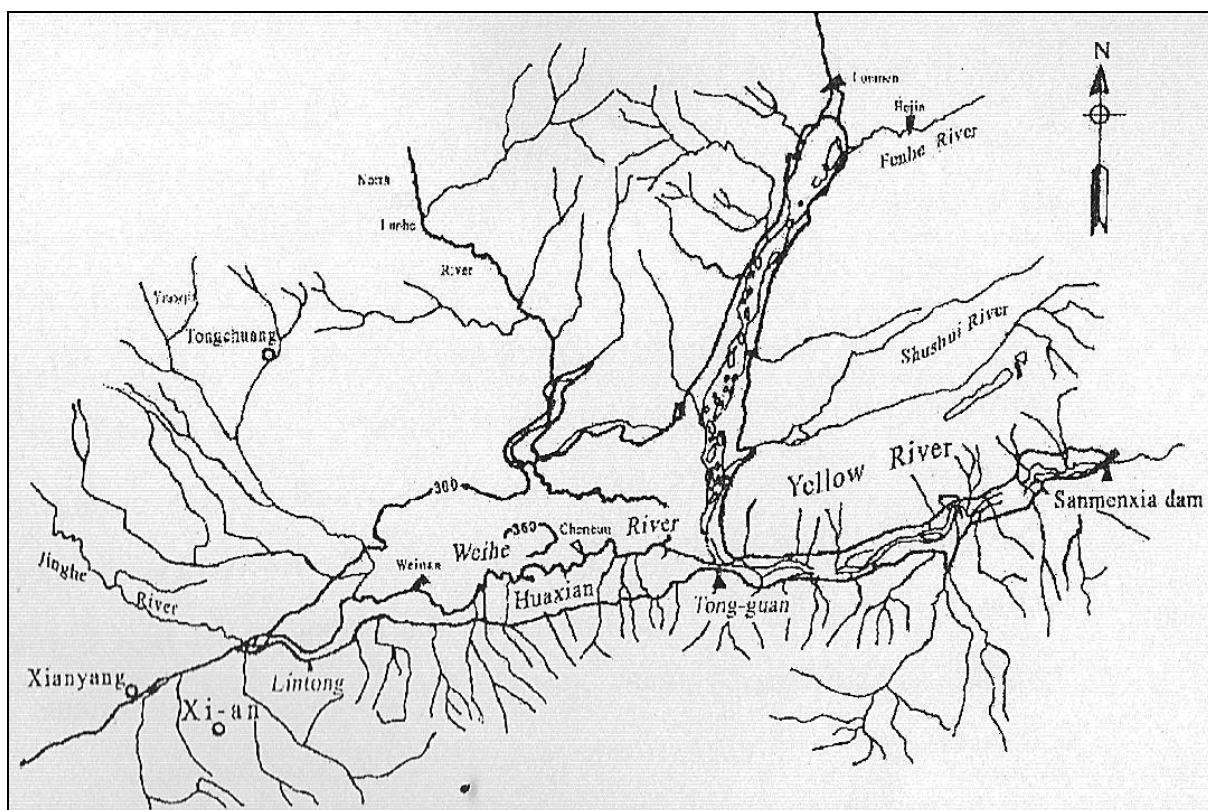


Fig.2.22 – Área da albufeira Sanmenxia (Wang (2003)).

O projecto da barragem e da albufeira teve em consideração a pesada carga sedimentar, o projectista planeou uma grande parte da capacidade da albufeira para a deposição de sedimentos, que se localiza sobretudo no rio Amarelo e não no rio Weihe.

A albufeira funcionou como bacia de armazenamento desde Setembro de 1960 até Março de 1962. Durante os primeiros 18 meses, 93 % dos sedimentos que entraram ficaram retidos na albufeira.

O mais sério problema causado por esta obra foi a sedimentação do rio Weihe e o risco de inundação para Xian, a capital anciã da China. O rio Weihe é o maior tributário do rio Amarelo e desagua neste em Tong-guan, figura 2.22. A elevação de Tong-guan é definida como o nível de inundação da descarga de $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ na estação de Tong-guan. A elevação de Tong-guan tem-se agravado após a construção da albufeira Sanmenxia, sobretudo devido à sedimentação que ocorreu desde então, Wang (2003).

Devido ao impacto negativo da rápida sedimentação no baixo rio Weihe, induzida pela represa da albufeira Sanmenxia, a barragem teve que ser reconstruída para melhorar a capacidade de libertação de sedimentos e o modo de operação da albufeira tem sido substancialmente alterado, para atingir um balanço entre a entrada e saída de sedimentos, Long e Chien, 1986, Wu, 1997, por Wang, 2003. A figura 2.23 mostra a variação da elevação de Tong-guan desde 1960 até 2001. Há três períodos ascendentes e dois períodos descendentes em resposta à reconstrução da barragem e alteração nos esquemas de operação da albufeira.

A figura 2.24 mostra a elevação do nível de água na estação hidrológica de Huaxian para descargas de cheia de 250 e $3\,000 - 5\,000\text{ m}^3/\text{s}$. A elevação do nível é definida como a diferença do nível de cheia presente menos o nível da mesma descarga antes da represa. Para uma descarga de $250\text{ m}^3/\text{s}$ o caudal é

confinado ao canal principal e a elevação do nível reflecte unicamente a sedimentação e alteração das dimensões do canal principal. Para uma descarga de cheia na faixa das 3 000 - 5000 m³/s, a elevação do nível é sobretudo devida à sedimentação no plano de cheia, Wang (2003).

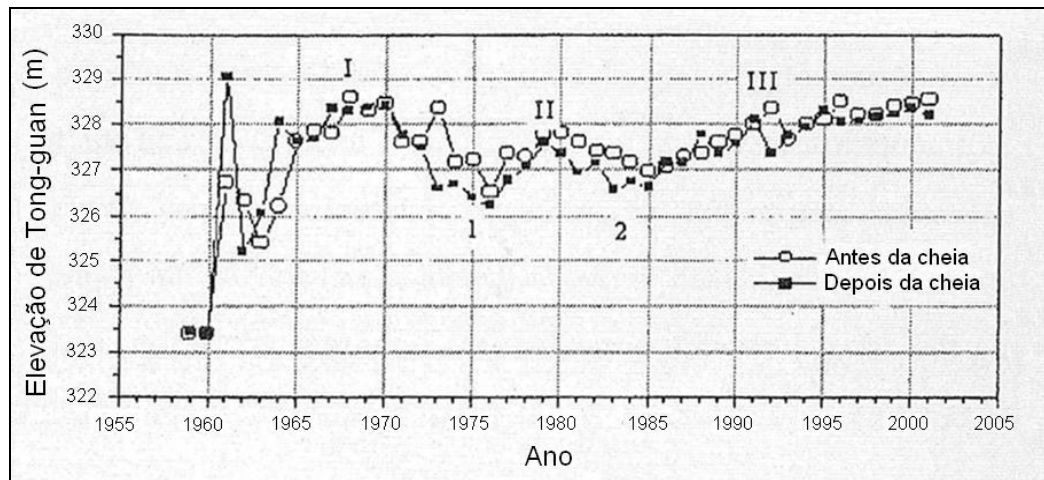


Fig.2.23 – Variação da elevação de Tong-guan ao longo do tempo (adaptado de Wang (2003)).

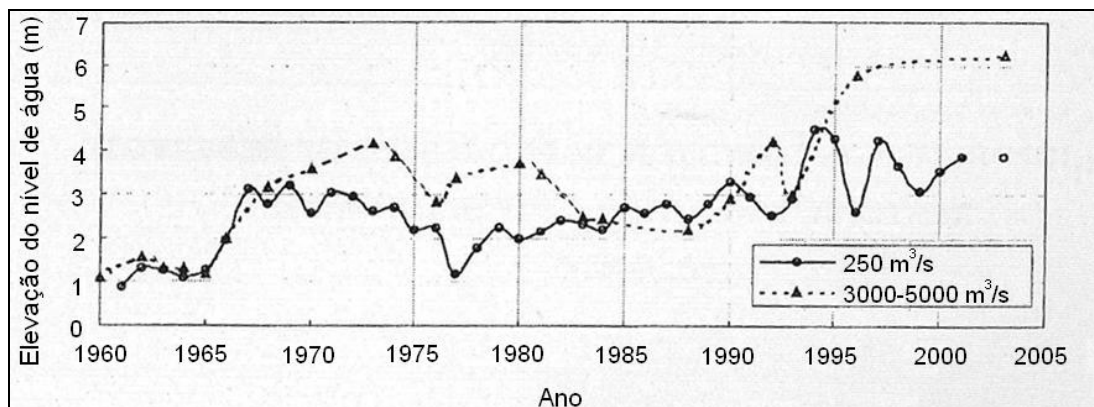


Fig.2.24 – Elevação do nível de água na estação hidrológica de Huaxian (adaptado de Wang (2003)).

Durante os períodos ascendentes da elevação da secção de Tong-guan, na década de 1960, tanto o nível de cheia como o nível do escoamento se elevaram acentuadamente de 4 m e 3 m, respectivamente. Durante os períodos descendentes da elevação em Tong-guan, entre 1970-1975 e 1980-1985, contudo, ocorreu erosão no canal e o nível de cheia reduziu-se de 1m a 2m. Em meados da década de 1990 o plano de cheia reforçado pela sedimentação não tinha sido inundado por diversos anos e a vegetação desenvolveu-se, o que aumentou muito a rugosidade e resistência do canal, como resultado, o nível de cheia aumentou abruptamente de 3 m ou 4 m para 6 m. Em Setembro de 2003 ocorreu uma cheia no Rio Weihe e o nível na estação hidrológica de Huaxian registado foi de 342,76 m, ou seja 0,51 m mais alto do que o mais alto nível registado na estação, apesar da descarga de cheia ser 230 m³/s, menor do que em 1998 (3 800 m³/s). Os muros de regularização foram galgados cinco vezes perto da cidade Huaxian e mais de 20 000 pessoas tiveram que ser evacuadas.

A albufeira Sanmenxia foi a primeira grande albufeira em rios com elevadas concentrações de sedimentos. Este projecto demonstrou os perigos de uma inadequada gestão de sedimentos nas fases de planeamento e projecto das albufeiras, Wang, 2003.

2.2.4. SUIÇA

Na Suíça, o interesse pelos problemas relacionados com os depósitos aluvionares na zona de transição dos rios para as albufeiras surgiu com as regularizações dos rios suíços realizadas no século XIX. Os levantamentos batimétricos foram essenciais para monitorizar o desenvolvimento dos deltas originados, na medida em que forneceram indicações mais exactas do volume total de sedimentos transportado pelo rio para a albufeira. Todos os importantes rios da Suíça têm sido monitorizados durante os últimos dois séculos.

O delta do rio Aare na albufeira Bienne foi monitorizado desde 1897 a 1933. O primeiro levantamento batimétrico foi realizado em 1878, depois em 1897 e 1913, quando o aproveitamento hidráulico de Kallnach modificou as condições de transporte de sedimentos do rio, Collet e Stumpf (1916), por Spreafico e Grasso (2003). Há uma grande diferença entre as quantidades de sedimentos transportados durante o período de 1878 - 1897 e o período de 1897 - 1913. Entre 1878 e 1897 a deposição de sedimentos anual foi de $241 \text{ m}^3/\text{km}^2$ enquanto que entre 1897 e 1913 foi de $112 \text{ m}^3/\text{km}^2$. Este resultado é a consequência do facto de em 1878 o curso do rio Aare ter sido desviado para a albufeira Bienne, pelo canal de Hagneck, com um aumento considerável da sua inclinação e do transporte de sedimentos associado. Durante o segundo período, isto é, 20 anos depois, o rio Aare encontrou um novo estado de equilíbrio, transportando muito menos sedimentos.

O delta do rio Aare na albufeira Brienz (fig.2.25) foi monitorizado desde 1898 até 1957. O primeiro levantamento batimétrico foi realizado em 1898 e o segundo em 1932, EAWW (1939), por Spreafico e Grasso (2003). Neste período o depósito sedimentar total, associado à bacia hidrográfica de 566 km^2 , foi estimado em cerca de $120 \text{ m}^3/\text{ano}$. Na área inspecionada, a altura média do depósito é cerca de 32 mm por ano. Uma nova inspecção foi conduzida em 1957. A comparação com o levantamento de 1932, mostrou que o volume do delta reduziu cerca de 2 milhões de m^3 em 24 anos. Este processo de erosão foi provavelmente induzido por correntes de turbidez, Liskay (1972), por Spreafico e Grasso (2003). O peso dos sedimentos suspensos medidos no rio Aare na estação de Brienzwiler é apresentado na figura 2.26.

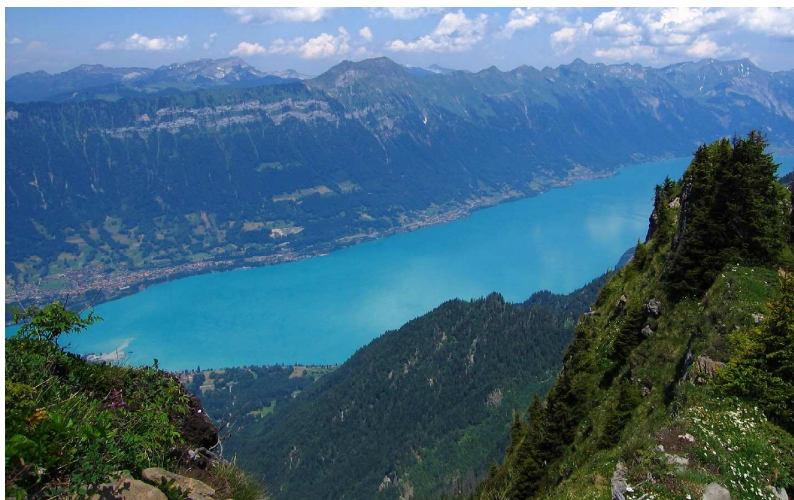


Fig.2.25 – Albufeira Brienz (<http://homepage.ntlworld.com/paul.j.parkinson/photos.html>).

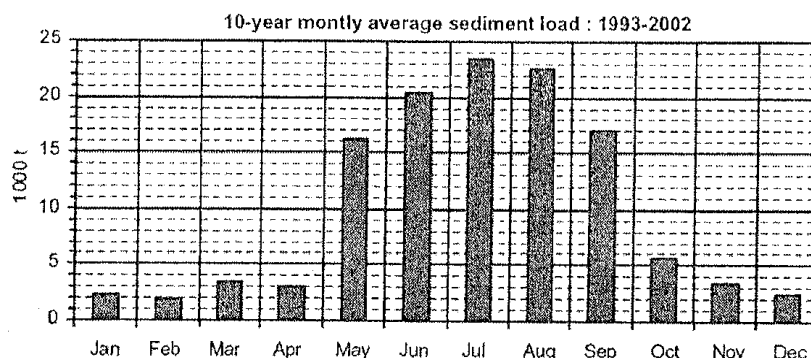


Fig.2.26 – Média mensal de 10 anos de carga sedimentar medidas na estação Aare – Brienzwiler (Spreafico e Grasso (2003)).

O delta do rio Maggia na albufeira Maggiore foi monitorizado desde 1890 até 1985. O propósito da primeira monitorização (1890) foi apenas efectuar um levantamento topográfico do fundo da albufeira Maggiore. A monitorização de 1926 foi efectuada com uma densidade de 330 medições por km². Em 1932 toda a parte superior da bacia da albufeira foi monitorizada (com uma média de 508 medições por km²). O aumento de volume do delta do rio Maggia foi determinado por comparação com a inspecção de 1926 em cerca de 167 000 m³ por ano. Esta pequena variação na produção de sedimentos pode ser atribuída ao facto de durante este curto período (6 anos) só ter sido registada uma grande cheia (1927). A medição seguinte foi feita 20 anos depois (1952). O volume médio de sedimentos depositados anualmente, neste período, foi de cerca de 243 000 m³ (cerca de 45 % mais do que no período 1926 - 1932), Waiser (1952), por Spreafico e Grasso (2003). Novas inspecções do delta do rio Maggia foram executadas em 1952 e no Inverno de 1984/85. A análise dos dados de todas as inspecções está apresentada no quadro 2.2, podendo concluir-se que o delta do rio Maggia tem acelerado o seu assoreamento.

Quadro 2.1 – Resultados das inspecções do delta do rio Maggia (adaptado de Spreafico e Grasso (2003)).

Período	Volume de sedimentos depositados (m ³)	Depósito anual médio de sedimentos (m ³)	Volume específico médio anual de sedimentos (m ³ /km ²)
1980-1926	19840000	567000	612
1952-1984	10400000	325000	351
1932-1952	4900000	243000	262
1926-1932	1002000	167000	180

O delta do rio Kander na albufeira Thun (fig.2.27) foi monitorizado desde 1914 até 1987. O rio Kander foi desviado para a albufeira Thun no ano de 1714, Grosjean (1962); Niklaus (1969), por Spreafico e Grasso (2003). Este delta, é o delta mais antigo dos rios da Suíça que resulta da interferência humana. A albufeira é inspeccionada só ocasionalmente, contudo as inspecções permitiram uma estimativa grosseira do crescimento do delta. A comparação das inspecções realizadas nos anos de 1866 e 1946 mostrou uma diferença de volume de aproximadamente 300 000 m³ por ano. Uma nova inspecção foi executada em 1986. Comparando com a inspecção de 1946 obtém-se uma taxa de crescimento de 118 700 m³ por ano, que corresponde a uma camada de 4 cm por ano. Em 1987, foi realizada nova inspecção. Da comparação desta monitorização com a de 1946 resulta uma

taxa de crescimento de cerca de $137\,900\text{ m}^3$ por ano que corresponde a uma camada de 5 cm por ano, BWB (1987), Spreafico e Grasso (2003).



Fig.2.27 – Albufeira Thun (<http://www.thunersee.com>).

2.2.5. ESPANHA, SERRA DE GÁDOR

Em Espanha, têm-se realizado vários estudos, em grandes albufeiras, para determinar o volume de sedimentos acumulados. Contudo, em bacias mais pequenas, sem estações de medição, estes estudos estão condicionados pela falta de dados disponíveis, pelo que, nestes casos, a utilização de pequenas barragens para a retenção de sedimentos pode ajudar na recolha de dados acerca do volume de sedimentos produzidos em tais bacias.

Esta análise foi realizada na face sul da Serra de Gádor, numa área de encosta da montanha abrangendo 320 km^2 que se eleva até mais de $2\,000\text{ m}$. É composta por 55 pequenas bacias com áreas entre 1 e 54 km^2 (fig.2.28). A distância entre o pico mais alto e o mar é pequena o que significa que as encostas são muito íngremes, dando origem a profundos e estreitos canais. Nas encostas inferiores, a principal característica dos canais é o seu elevado quociente largura/profundidade. Estes leitos em cascalho (denominados “ramblas” na região mediterrânica de Espanha) estão secos a maior parte do ano, mas tornam-se particularmente activos durante as cheias.

A área em estudo possui um clima mediterrânico, caracterizado por Verões quentes e secos e Invernos amenos. A escassez de precipitação, a forte insolação (cerca de $2\,900$ horas por ano), a variabilidade de precipitação anual e o elevado potencial de evaporação, dão um carácter semi-árido à área. A temperatura aumenta de uma média de 16 °C nas montanhas para uma média de 18.7 °C no Campo de Dalías. O resto da bacia do Mediterrâneo é susceptível a precipitações muito intensas em algumas ocasiões, Martín Rosales *et al*, 1996b, por Martín-Rosales *et al.*, 2003.

Historicamente, a Serra de Gádor tem sido sujeita a uma intensa desflorestação, o que tem conduzido à degradação da cobertura vegetal. A causa desta tremenda perda de vegetação é encontrada no uso histórico de madeira para a construção de barcos, na extensiva exploração mineira na área durante os séculos XIX e XX e no derrube de carvalhos e pinheiros para combustível. É merecedor de destaque

que Almería, hoje uma das mais desflorestadas províncias em toda a Espanha, teve uma cobertura florestal significativa no século XVIII. Hoje, a vegetação nas bacias consiste num degradado matagal e estepe, como resultado de excesso de pastoreio. Uma grande parte da área está coberta por terra seca, que tem estado quase totalmente abandonada.

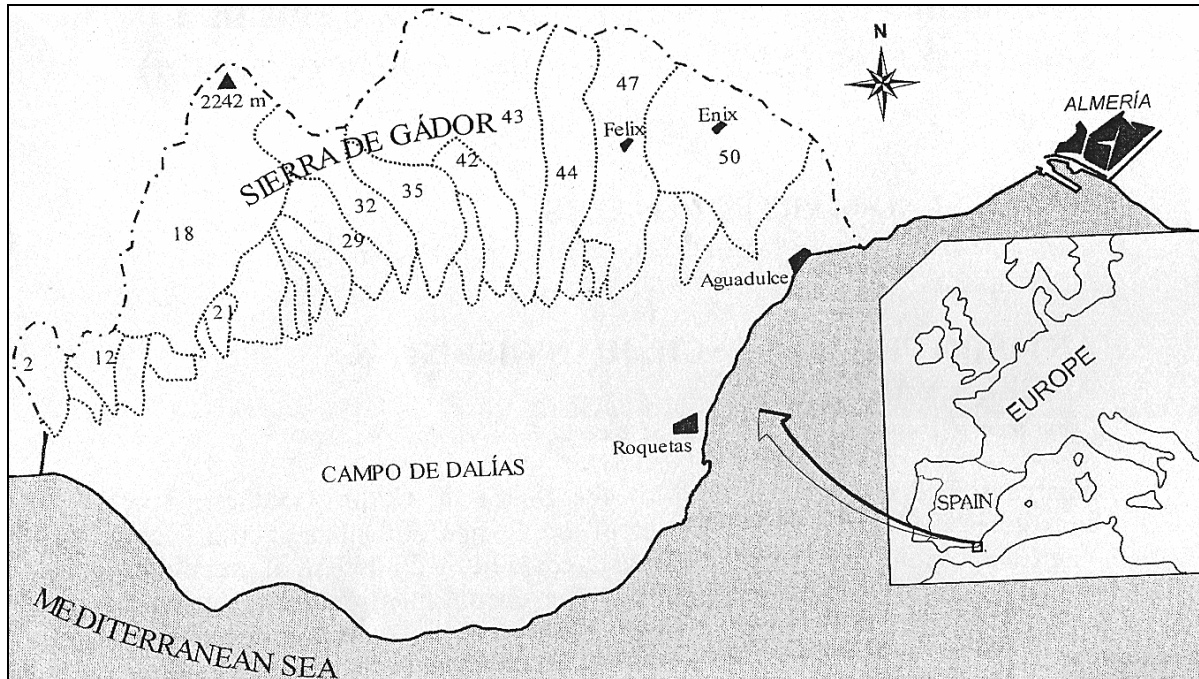


Fig.2.28 – Localização das bacias (...) e das fronteiras hidrológicas (---) em estudo na Serra de Gádor (Martín-Rosales *et al.* (2003)).

A prática local extensiva de culturas em estufa altamente rentáveis, juntamente com o facto das encostas formarem a área de recarga natural dos aquíferos do Campo de Dalías, levou à criação de um programa de reflorestação. Este programa contribuiu para a construção das 165 pequenas barragens (das quais 107 foram construídas entre 1976 e 1993, em 16 bacias) para reter os sedimentos das várias bacias, Martín Rosales (1997), por Martín-Rosales *et al.* (2003). As barragens têm uma altura entre 3 e 14 m e têm até 45 m de comprimento. Estas barragens estão localizadas a altitudes entre 130 e 1435 m acima do nível médio da água do mar. São estruturas gravíticas, com secção transversal trapezoidal e com descarregadores de fundo a diferentes níveis para evitar o enchimento prolongado durante as cheias. O inventário conta seis barragens sólidas de betão, 29 em gaviões e 72 barragens de pedra. Destas estruturas, 59 % estão situadas somente em 4 das bacias, nomeadamente as “ramblas” de Carcauz, o Cañuelo, Vícar e as Hortuchuelas.

A capacidade para a retenção de sedimentos, em toda a rede de barragens, tem sido calculada em 431000 m³. Esta capacidade, contudo, foi reduzida em 53 000 m³. A redução tem sido maior nas bacias orientais, reflectindo a grande área de superfície impermeável e afloramentos que facilmente sofrem erosão, assim como a maior desflorestação e impacto humano que estas áreas têm sofrido. Para além disso, estas bacias contêm áreas abandonadas onde nunca mais ocorreram praticas de conservação do solo, o que acentua os fenómenos de erosão. Uma prova da acção erosiva significativa é o presente estado da bacia 62. Esta barragem, de gaviões, construída em 1981 estava, em 1986, 100% sedimentada. A jusante da barragem 62, a barragem 60, que em 1986 não tinha sedimentos, estava 33 % assoreada em 1995. Isto indica taxas de sedimentação da ordem dos 743 m³/km² por ano,

a mais elevada taxa estimada na face sul da Serra de Gádor, Martín Rosales (1997), por Martín-Rosales *et al.*, (2003).

Em 16 de Fevereiro de 1994 ocorreu uma pequena cheia, durante a qual foram recolhidas amostras dos sedimentos em suspensão em duas bacias (47 e 50, fig. 2.29).

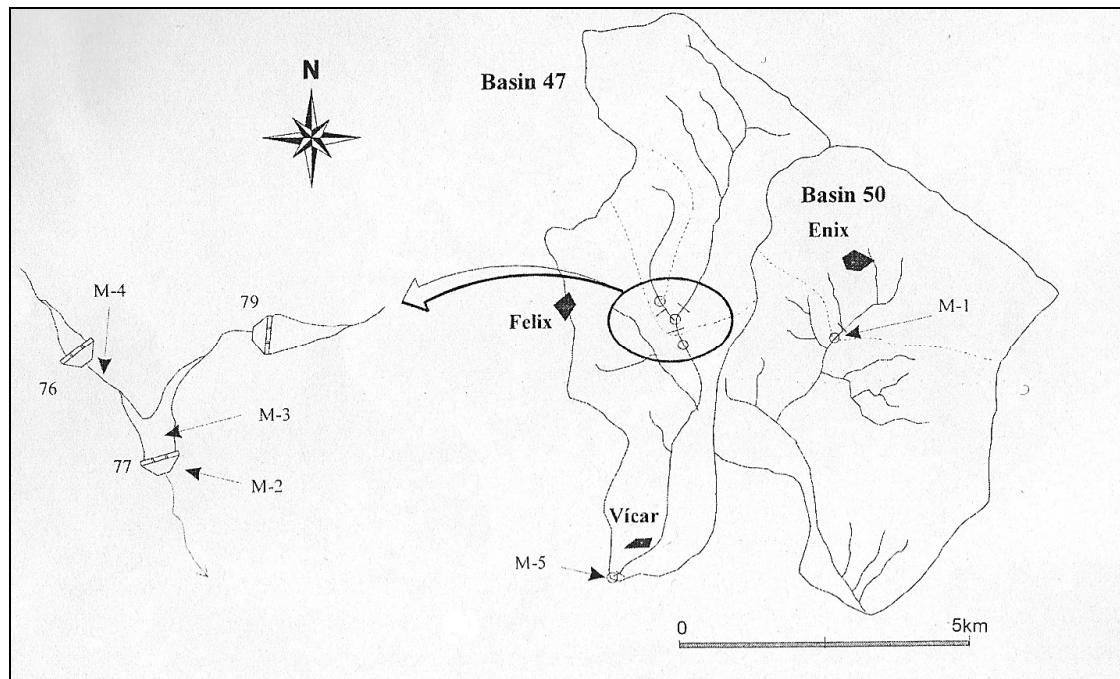


Fig.2.29 – Localização topográfica dos pontos de recolha das amostras dos sedimentos em suspensão (Martín-Rosales *et al.* (2003).

A chuvada durou 20 horas, durante as quais caíram 72 mm. O caudal de pico estimado para esta cheia foi de 4 m³/s. A primeira amostra (M-1) foi recolhida na bacia 50, 300 m a jusante da barragem 90. A concentração de sedimentos em suspensão era de 2 200 mg/l, com um caudal de 200 l/s. Relativamente às amostras correspondentes à bacia 47, a primeira amostra foi recolhida a jusante da barragem 76 (M-4). A concentração de sólidos suspensos desta amostra era de 680 mg/l. O caudal sobre o descarregador da barragem na altura da amostragem era de 945 l/s. Considerando a diferença entre as concentrações a montante (M3) e a jusante da barragem 77 (M2) igual à fracção retida atrás da barragem, obteve-se um coeficiente de retenção de 0.35. Este efeito de retenção também pode ser deduzido através da figura 2.30, que mostra a concentração dos sólidos suspensos em função da área da superfície das bacias avaliadas. Embora o grau de correlação entre 4 das amostras (M-1, M-3, M4 e M5) seja muito alto com R²=0.980, a amostra M2 não segue esta tendência. Isto pode significar que a concentração dos sólidos suspensos da amostra M2 é anormalmente baixa, pelo menos em comparação com as outras amostras.

Considerando a eficiência da retenção, inferida através da inspecção das amostras, representativa de todas as barragens, obtém-se uma produção de sedimentos média para a face sul da serra de Gádor de perto de 50 m³/km² por ano. O valor máximo em certas áreas é de 2 100 m³/km² por ano. Nas vizinhanças da bacia do rio Adra, que fica na fronteira oeste da área de estudo, foi efectuada uma inspecção detalhada de uma pequena barragem durante 6 anos, obtendo-se valores de sedimentação de 100 m³/km² por ano. A área da bacia era igual a 198 km² e o uso da terra é muito similar, Arrasco *et al.* (1982), por Martín-Rosales *et al.* (2003).

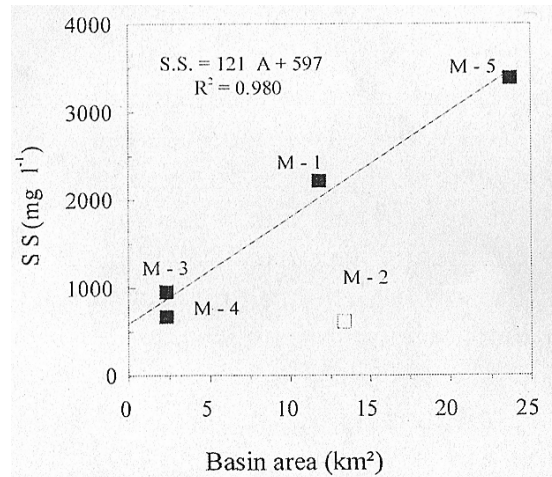


Fig.2.30 –Relação entre os sedimentos em suspensão e a área das bacias (Martín-Rosales *et al.* (2003)).

As características estruturais destas pequenas barragens são muito comuns por toda a região mediterrânica e poderiam ser úteis para estimar a produção de sedimentos em pequenas bacias sem estações de medição implementadas. Embora a sua eficiência de retenção seja muito baixa quando comparadas com as grandes albufeiras, estas barragens podem ser bons indicadores da erosão da bacia, Martín-Rosales *et al.* (2003).

3

METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO EM ALBUFEIRAS

3.1. TRANSPORTE E SEDIMENTOS

3.1.1. INTRODUÇÃO

Os processos de erosão e sedimentação são fenómenos complexos que se regem por múltiplos parâmetros. A análise destes processos em termos de engenharia tem tradicionalmente combinado conhecimentos teóricos e empíricos. O transporte de sedimentos numa determinada secção transversal de um rio é determinado por parâmetros no local considerado, assim como a montante ao longo da bacia hidrográfica. Os principais parâmetros são: topografia, meteorologia, hidrologia, petrografia, depósitos de sedimentos fluviais, padrões de uso da terra, e outras actividades humanas na bacia.

A descrição qualitativa dos processos de erosão e sedimentação serviu de guia à definição de métodos quantitativos que os traduzem. Quando o transporte de sedimentos passou a ser parte integrante da engenharia hidráulica, Meyer Peter, Einstein e outros apresentaram leis empíricas, funções e diagramas de grande utilidade. Estes métodos quantitativos foram utilizados para resolver vários problemas de transporte de sedimentos com aplicação em rios cujo leito era constituído por silte, areia e gravilha com gradientes suaves. Contudo, a maior parte dos métodos analíticos falhavam quando aplicados a rios de leito com maior rugosidade (com elementos rochosos, por exemplo) e com gradientes mais elevados e irregulares, Helland-Hansen *et. al.* (2005).

3.1.2. INÍCIO DO MOVIMENTO

No escoamento de um curso de água, a água exerce forças sobre cada partícula sólida, que se denominam força de arrastamento e força de sustentação.

A força de arrastamento actua na direcção principal do escoamento e a força de levantamento actua na direcção perpendicular ao escoamento. Ambas são, em princípio, proporcionais ao quadrado da velocidade média do escoamento u , e à área de exposição ao escoamento A , mas precisam de correcções empíricas para incluir efeitos de forma e orientação das partículas C_A e C_L , designadas por coeficientes de arrastamento e sustentação respectivamente. As fórmulas gerais para as forças de arrastamento e sustentação são:

$$F_A = C_A \cdot A \cdot \rho_s \cdot \frac{u^2}{2}$$

$$(3.1) \quad F_S = C_S \cdot A \cdot \rho_s \cdot \frac{u^2}{2} \quad (3.2)$$

Para além destas forças exercidas pela água, a partícula está também sujeita à força de gravidade. A figura 3.1 representa as diversas forças intervenientes na análise de estabilidade de uma partícula singular exposta ao escoamento, Lysne *et al.* (2003).

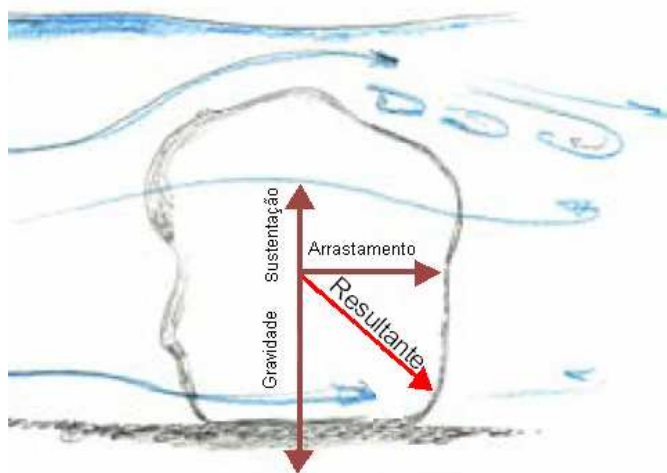


Fig.3.1 – Forças a que as partículas expostas ao escoamento estão sujeitas (adaptado de Støle (2008)).

O parâmetro que mais influencia o comportamento dos sedimentos face ao escoamento hidráulico é a velocidade de deposição w . A figura 3.2 mostra a velocidade de deposição de partículas esféricas de quartzo em águas paradas e em ar. Este gráfico permite concluir que para partículas com o mesmo diâmetro a velocidade da deposição é sempre superior no ar do que na água e aumenta com o aumento da temperatura.

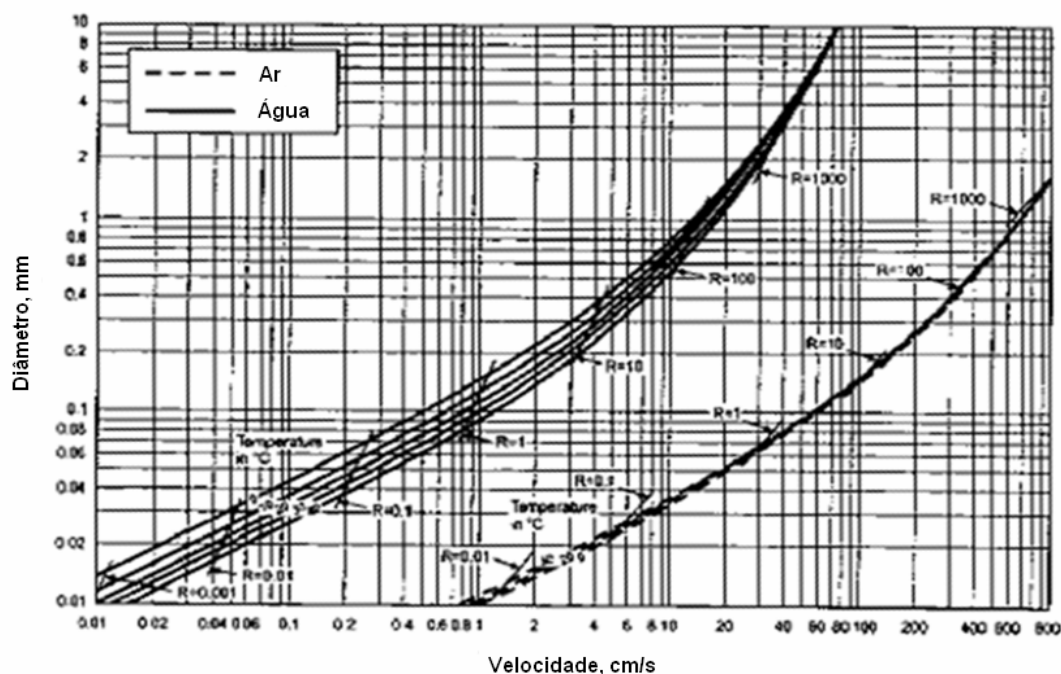


Fig.3.2 – Velocidade de deposição de esferas de quartzo em água e ar (adaptado de Lysne *et al.* (2003)).

A velocidade de deposição é afectada por muitos parâmetros dos quais o peso submerso e a forma são os mais proeminentes no escoamento num curso de água, mas também a temperatura e a viscosidade exercem efeitos notáveis.

Por ser complicado analisar cada partícula singular, quando se pretende analisar um escoamento real, num rio por exemplo, em que a quantidade de partículas transportadas é grande e o seu tamanho é muito variável, a teoria do transporte de sedimentos assume, em geral, as tensões tangenciais e a turbulência geradas como os parâmetros determinantes para o movimento próximo do leito.

A tensão tangencial é a força média por unidade de área exercida pela água no material depositado no leito do rio. Num escoamento viscoso, a tensão tangencial é o efeito directo da viscosidade do fluido que adere às partículas do leito. Contudo, escoamentos viscosos dificilmente são encontrados em cursos de água naturais, onde, a tensão tangencial resulta da turbulência, transferindo momento para o leito. Em escoamento uniforme, quando o leito e a superfície da água são aproximadamente paralelos, a tensão tangencial no leito τ_0 , obtém-se combinando directamente a aceleração da gravidade g , com a inclinação do leito i , a massa volúmica do fluido ρ_w , e o raio hidráulico R_H ($R_H = A/P$, o quociente entre a secção do escoamento A e o perímetro molhado P):

$$\tau_0 = g\rho_w R_H i \quad (3.3)$$

A turbulência é definida como um fluxo de movimento irregular, resultante de turbilhões que são transportados pelo fluxo rodando de forma irregular. Devido à turbulência, a velocidade do fluxo num ponto flutua em torno do seu valor médio, e a tensão tangencial no leito flutua de forma similar. Isto é importante para a estabilidade das partículas do leito relativamente ao movimento do fluido, uma vez que são os picos da tensão tangencial do fluxo flutuante que determinam se uma partícula se moverá ou não. Quanto mais turbulento um escoamento for, maiores são as partículas que podem ser movidas por uma dada tensão tangencial média, Lysne *et al.* (2003).

A medição directa da turbulência é na prática impossível de efectuar, mas a turbulência afecta a distribuição das velocidades próximo do leito. Se a velocidade média em dois pontos próximos do leito é conhecida, é possível avaliar o efeito da turbulência e calcular a tensão tangencial no leito utilizando as seguintes expressões:

$$u_* = \frac{0.17(u_1 - u_2)}{\log(z_1 - z_2)} \quad (3.4) \quad \tau_0 = u_*^2 \cdot \rho_w \quad (3.5)$$

em que u_* representa um parâmetro fictício chamado “velocidade tangencial”, u_1 e u_2 as duas velocidades conhecidas, z_1 e z_2 as distâncias correspondentes medidas a partir do nível do leito, τ_0 é a tensão tangencial no leito e ρ_w é a massa volúmica da água.

Quando as velocidades são pequenas e, conseqüentemente, as forças hidrodinâmicas que se exercem sobre as partículas depositadas no leito do rio também o são, as partículas permanecem estáveis. À medida que as forças hidrodinâmicas aumentam, é, eventualmente, atingida uma situação em que as partículas se deslocam da sua posição, movendo-se com o escoamento. Este movimento não é generalizado instantaneamente a todas as partículas, visto que o carácter aleatório da intensidade das forças hidrodinâmicas, típico dos escoamentos turbulentos, determina que o início do processo de deslocação das partículas seja também aleatório. Contudo, as partículas menos pesadas são, em média, deslocadas das suas posições iniciais mais rapidamente.

Se um rio corre através de áreas onde o material do leito tem uma composição bem graduada, devido ao carácter turbulento do escoamento, tanto as partículas grossas como as finas terão uma determinada probabilidade de serem movimentadas, sendo que, a probabilidade das partículas finas é muito maior, o que conduz a uma separação das partículas do leito. Ao longo do tempo, o processo de separação removerá uma grande parte de partículas finas enquanto que as partículas mais grossas permanecerão no lugar ou mover-se-ão pontualmente. A bem graduada composição original do leito do rio alterar-se-á, então, para um leito caracterizado sobretudo pelas fracções mais grossas do material original. Este

leito resistirá genericamente a uma maior tensão tangencial do que o leito de composição original, Lysne *et al.* (2003).

Shields combinou as expressões para as forças destabilizadoras de arrastamento e sustentação com as expressões para o peso e o atrito como forças estabilizadoras, numa fórmula geral para o equilíbrio de partículas, obtendo:

$$C_s = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_w)gd} \quad (3.6)$$

em que ρ_s representa a massa volúmica das partículas e d o diâmetro das partículas.

A figura 3.3 mostra o famoso diagrama de Shields que relaciona este parâmetro C_s com o número de Reynolds dado pela expressão:

$$Re = \frac{u_* d}{\nu} \quad (3.7)$$

em que u_* é a velocidade tangencial e ν o coeficiente de viscosidade cinemática da água. A curva foi encontrada com base em experiências e é válida também para diferentes tipos de sedimentos e outros fluidos para além da água.

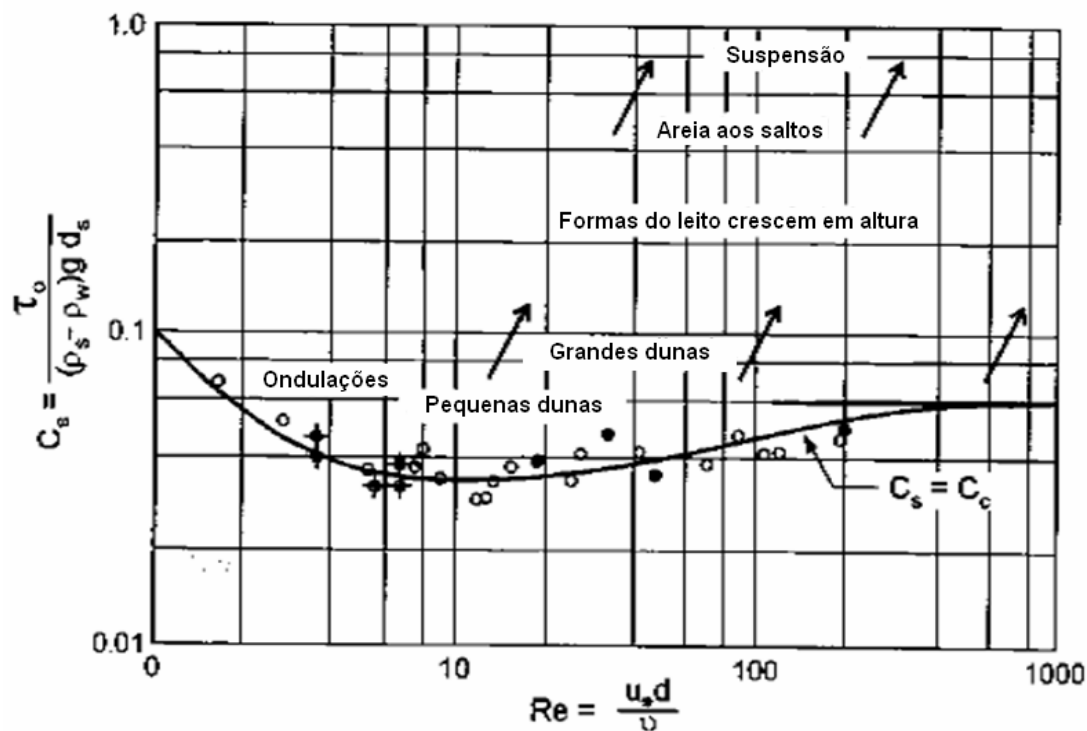


Fig.3.3 – Diagrama de Shields (adaptado de Lysne *et al.* (2003)).

Valores de C_s abaixo da curva indicam estabilidade contra o movimento. Um valor na curva indica início de movimento e é chamado número crítico de Shields, C_c . O valor correspondente da tensão tangencial, τ_c é chamada tensão tangencial crítica.

O diagrama foi elaborado para sedimentos uniformes, mas pode ser utilizado para misturas de sedimentos, com bons resultados, usando em vez de d o d_{60} (60 % de finos). Na prática, o valor de C_c igual a 0.06 pode ser usado para diâmetros das partículas superiores a 1mm, uma vez que para

partículas desta dimensão basta que a velocidade tangencial seja superior a 0,04 m/s para que o número de Reynolds assuma valores superiores a 400, sempre correspondentes a um C_c igual a 0.06, como se conclui do diagrama de Shields, Lysne *et al.* (2003).

3.1.3. TRANSPORTE EM SUSPENSÃO

O escoamento turbulento tende a destacar e levantar as partículas que, uma vez em suspensão, mover-se-ão para jusante com a corrente e tendem a depositar-se, devido à acção da força de gravidade mas são mantidas em suspensão pela componente vertical ascendente da turbulência que aponta para cima. Contudo, as componentes ascendentes são, no movimento turbulento, iguais às componentes descendentes. Para compensar o movimento de queda devido à gravidade o movimento ascendente, no escoamento turbulento, deverá transportar mais partículas do que o movimento descendente. Por isso, num transporte suspenso estável a concentração de partículas aumenta da superfície para o fundo, sendo essa variação dependente da natureza do escoamento. O gradiente de concentração é afectado principalmente pela velocidade de queda das partículas e pela intensidade da turbulência. Assim:

- Quanto mais pequenas forem as partículas em suspensão, menor é a velocidade de deposição e mais uniforme é a distribuição vertical dos sedimentos.
- Quanto mais intensa for a turbulência, mais uniforme é a distribuição vertical dos sedimentos.

Assim, a concentração de partículas em suspensão no seio de um fluido resulta da conjugação dos efeitos sobre elas das componentes verticais das forças de turbulência e da força de gravidade. Dado o grande número de partículas normalmente existentes e o carácter aleatório dos fenómenos de turbulência, o equilíbrio resultante da referida conjugação de efeitos só tem significado em termos estatísticos, Lysne *et al.* (2003).

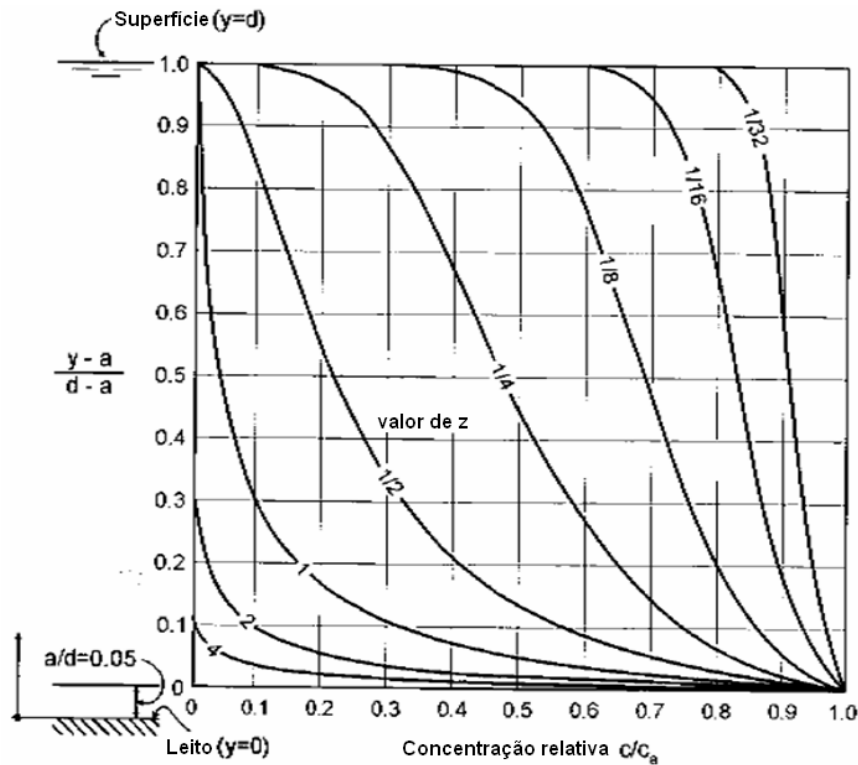
Hunter Rouse (1937), desenvolveu uma fórmula para a distribuição da concentração c a qualquer nível y acima do leito em relação à concentração c_a ao nível a e à profundidade de água h :

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^z \quad (3.8) \quad z = \frac{w}{\beta k u_*} \quad (3.9)$$

em que w representa a velocidade de deposição das partículas e u_* a velocidade tangencial, enquanto a constante β é igual a 1.0 para partículas finas e k é igual a 0.4 para fluidos límpidos. Como a fórmula requer um valor conhecido c_a não pode ser resolvida genericamente. Rouse apresentou um diagrama que mostra a distribuição relativa para vários valores de z (fig.3.4).

Não se encontram disponíveis fórmulas adequadas para o cálculo directo do volume de sedimentos transportados em suspensão. A fórmula 3.8 necessita de, pelo menos, uma amostra fidedigna. Se existirem amostras suficientes, é possível aplicar a fórmula 3.10 para determinar a quantidade de sedimentos transportados em suspensão, Q_s que passa na secção A durante o tempo de recolha da amostra, em que C representa a concentração dos sedimentos transportados em suspensão e u a velocidade média no mesmo ponto. Se um número de amostras suficiente for recolhido ao longo dum período T , a quantidade de sedimentos transportados em suspensão pode ser determinada pela fórmula 2.11. A recolha e análise de amostras de sedimentos transportados em suspensão é muito demorada e requer pessoal qualificado para a obtenção de bons resultados, Lysne *et al.* (2003).

$$Q_s = \int_A C(y, z) u(y, z) dz dy \quad (3.10) \quad Q_{sT} = \int_T Q_s dt \quad (3.11)$$

Fig.3.4 – Diagrama de Hunter Rouse (adaptado de Lysne *et al.* (2003)).

3.1.4. TRANSPORTE POR ARRASTAMENTO

Quando, num leito granular, o limite para o início do movimento é excedido, algumas partículas começarão a mover-se. O leito desenvolverá gradualmente formas ondulantes, que ajustarão o seu tamanho e forma dependendo do tamanho das partículas e da tensão tangencial. Mal o limite para o movimento de partículas de areia finas é excedido, inicia-se uma série de transformações nas formas do leito, como mostra a figura 3.5.

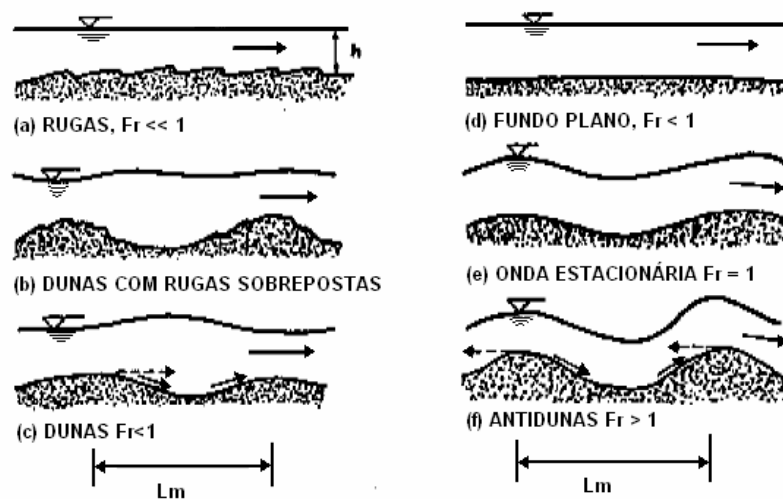


Fig.3.5 – Configurações do leito num escoamento de "fundo móvel" (Lencastre e Franco (2006)).

Em regime lento ($Fr < 1$), com o incremento da velocidade do escoamento, o leito apresentará pequenas rugas (fig.3.5 (a)) que ao crescerem originam as dunas com rugas sobrepostas (fig.3.5 (b)), que acabam por desaparecer ficando só as dunas (fig.3.5 (c)), que também desaparecem ficando o leito novamente liso (fig.3.5 (d)). As rugas só ocorrem em material relativamente fino (diâmetro menor que 2 mm e velocidade de queda inferior a 8 mm/s). Tanto as dunas como as rugas não ocupam normalmente toda a secção transversal do escoamento; ambas as formações tendem a constituir cristas que vão avançando lentamente no sentido do escoamento.

Se a velocidade do escoamento continua a aumentar e se se estabelece o regime crítico do escoamento ($Fr = 1$), formam-se ondulações de areia no fundo, em associação e em fase com ondas estacionárias à superfície da água (fig.3.5 (e)).

Em consequência de um novo incremento de velocidade o escoamento ocorrerá em regime rápido ($Fr > 1$) o que se traduzirá pelo deslocamento em sentido contrário ao do escoamento das cristas das ondulações do fundo, constituindo as anti dunas, continuando, contudo, a areia do fundo a caminhar para jusante (fig.3.5 (f)). A formação das anti dunas depende da interacção entre o escoamento, cuja superfície livre tem ondulações cada vez mais inclinadas, e o material de fundo, o que implica que só possam ser encontradas em escoamentos fluviais e não nas areias que sofram directamente a acção do vento.

De acordo com a teoria de Kennedy - Reynolds o comprimento de onda da superfície formada quer pelas dunas, quer pelas anti dunas, pode ser determinado pela seguinte equação:

$$L_m = \frac{2\pi u^2}{g} \tanh \frac{2\pi h}{L_m} \approx \frac{2\pi u^2}{g} \quad (3.12)$$

em que L_m representa o referido comprimento, u a velocidade média da corrente, g a aceleração da gravidade e h a altura da água, Lencastre e Franco (2006).

Remetendo para o diagrama de Shields (fig.3.3), o tamanho das formas do leito aumenta com o aumento de C_* . Estas formas constituem uma boa interface de troca entre material transportado por arrastamento e material transportado em suspensão.

O leito não assume estas formas em rios cujo fundo é constituído por cascalho ou material mais grosseiro. Se o leito do rio é plano, a resistência do escoamento pode ser estimada com base na fórmula de Strickler para o número de Manning $n = d_{90}^{1/6} / 26$. $M = 1/n$ é usado em muitos países, Lysne *et al.* (2003).

Muitas instituições de investigação desenvolveram fórmulas para determinação do transporte de sedimentos por arrastamento. As primeiras tentativas combinaram observações empíricas com teorias simples e chegaram a fórmulas adequadas, sobretudo para condições similares às que forneceram os valores observados. Algumas sobreviveram e poderão continuar a ser usadas para estimar simplificada o número de grelhas necessárias para interceptar o material transportado por arrastamento e a acumulação de material grosseiro à entrada da albufeira. A fórmula de Shields que é baseada no diagrama de Shields é fácil de utilizar quando a tensão tangencial é conhecida:

$$g_s = 10qi \frac{\tau_0 - \tau_c}{((\rho_s - \rho_w) / \rho_w)^2 d_{50}} \quad (3.13)$$

A fórmula de Meyer-Peter e Müller foi desenvolvida para se adequar a canais inclinados e por isso é útil em muitos casos de aproveitamentos hidráulicos em rios inclinados:

$$g_s = \sqrt[3]{\left(\frac{g\rho_w iR(k/k') - 0.047g(\rho_s - \rho_w)d_{50}}{0.25\rho_s^{1/3}((\rho_s - \rho_w)/\rho_s)^{2/3}} \right)^3} \quad (3.14)$$

em que g_s representa o peso de sedimentos por unidade de tempo e largura (N/(ms)), q o caudal unitário, i a inclinação da linha de Energia, k/k' uma correcção da forma do leito igual a 1 para leitos planos e igual a 0.5 para leitos rugosos devido às ondulações do fundo, ρ_s e ρ_w são as massas volúmicas das partículas e da água, respectivamente, τ_0 e τ_c a tensão tangencial do leito e a tensão tangencial crítica, respectivamente, Lysne et al., 2003.

A fórmula de Einstein para determinação do caudal sólido transportado por arrastamento, q_{sa} definido por unidade da secção (m³/ms) traduz-se na seguinte relação:

$$q_{sa} = wd40\left(\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w)d}\right)^3 \quad (3.15)$$

em que w representa a velocidade de queda das partículas, d é o diâmetro das partículas em mm, γ_s e γ_w são, respectivamente, o peso volúmico dos sedimentos e da água.

Neil apresentou a seguinte equação conservativa, para a determinação do início do arrastamento em canais com material de fundo incoerente e uniforme:

$$\frac{u_c^2}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right)d\gamma_w} = 2,5 \times 10^{-4} \left(\frac{d}{h}\right)^{-0.20} \quad (3.16)$$

em que u_c representa a velocidade média do escoamento a partir da qual se inicia o arrastamento em m/s, γ_s , γ_w e d têm o mesmo significado da equação anterior, e h a profundidade média do escoamento em m Lencastre e Franco, 2006.

3.1.4. TRANSPORTE TOTAL VS TRANSPORTE POR ARRASTAMENTO

O diagrama da figura 3.6, da autoria de Laursen (1958), mostra a proporção relativa de transporte por arrastamento e total, Lysne *et al.* (2003). Como se pode observar, o transporte por arrastamento é a forma de transporte dominante enquanto a velocidade de deposição é superior à velocidade tangencial, já definidas. Esta é a situação quando as partículas do leito são grossas e a velocidade do escoamento é relativamente baixa.

Por outro lado, em rios com o leito constituído por finos e com fortes correntes, o transporte por arrastamento representa, usualmente, uma pequena fracção do transporte total. As setas na figura mostram que se u_*/w for igual a 6.6, o transporte por arrastamento representa 16/400 (4%) do transporte total, Lysne *et al.* (2003).

Existem diversos métodos para o cálculo da quantidade total de sedimentos transportados de forma simples e relativamente precisa. Engelund e Hansen apresentaram uma fórmula fiável em 1967:

$$g_s = 0.05g\rho_w u^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{g(\rho_s - \rho_w)/\rho_w} \left(\frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho_w)d_{50}}\right)^3} \quad (3.17)$$

em que u representa a velocidade média na secção transversal. Esta fórmula é recomendada para rios onde o “ d_{50} ” do leito é superior a 0.15 mm e o desvio padrão da distribuição do tamanho dos grãos é menor que 2, Lysne *et al.* (2003).

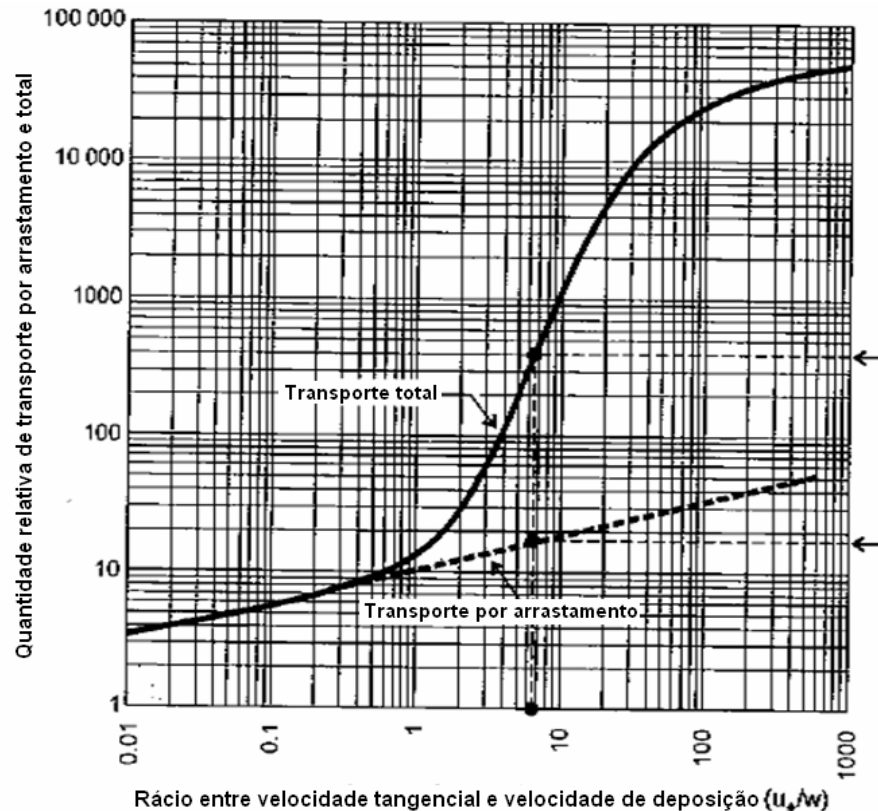


Fig.3.6 – Relação entre transporte por arrastamento e transporte total (adaptado de Lysne *et al.* (2003)).

3.1.5. RECOLHA DE AMOSTRAS E ANÁLISE LABORATORIAL

Raramente se considera que a amostragem e análise de sedimentos é mais importante que as observações meteorológicas e a medição dos caudais. Os sedimentos estão, afinal de contas, relacionados com o lado dos custos dos projectos de desenvolvimento enquanto a medição geral dos caudais, sendo um “mapeamento dos recursos naturais” está relacionada com o ganho desses mesmos projectos. Portanto, os recursos disponíveis para a análise dos sedimentos produzidos são geralmente menos numerosos do que os associados aos caudais.

Como já foi referido, a determinação do volume de sedimentos transportados requer a recolha de amostras de sedimentos fidedignas. As principais variáveis e parâmetros que se pretendem avaliar a partir de tais amostras são:

- Concentração de sedimentos transportados em suspensão;
- Distribuição granulométrica dos sedimentos transportados em suspensão;
- Percentagens de transporte por arrastamento junto ao leito;
- Distribuição granulométrica do material do leito;
- Composição mineralógica e petrográfica dos sedimentos;
- Conteúdo em matéria orgânica nos sedimentos;
- Densidade dos sedimentos depositados.

A distribuição granulométrica dos sedimentos que chegam a uma albufeira permite prever o padrão de deposição dos sedimentos na mesma albufeira. A fim de recolher uma amostra fidedigna é necessário escolher a localização, o pessoal e o método adequados. A localização deve ser escolhida com base na existência de dados anteriores, na proximidade a estações hidrológicas de medição e na acessibilidade

durante a época das cheias. A correcta recolha de amostras é tão importante como a correcta análise laboratorial, pelo que, o pessoal responsável deverá ser qualificado, activo, dinâmico, honesto e estar treinado para compreender o princípio da amostragem, Støle (2008).

Na figura 3.7 apresenta-se o amostrador US RBMH-80 que tem um recipiente semicilíndrico para recolha de material do leito. Este aparelho é facilmente operado, através de uma alavanca que o abre e fecha. O material do leito é protegido da erosão enquanto se eleva através da coluna de água. O tamanho do recipiente é de 8cm por 7cm e recolhe amostras até uma profundidade de 5cm.

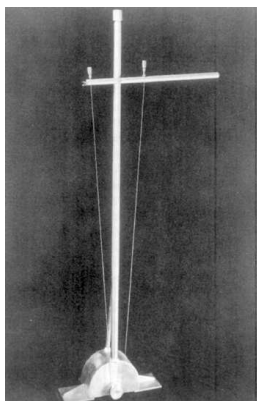


Fig.3.7 – Amostrador US RBMH-80 para recolha de material do leito (<http://www.rickly.com/ss/bedmaterial.htm>).

As amostras de sedimentos transportados por arrastamento junto ao leito são recolhidas no amostrador apresentado na figura 3.8 que é colocado sobre o leito, paralelamente à corrente, com a abertura direccionada para montante, <http://www.rickly.com/ss/bedmaterial.htm>.

A rede de que são feitas as paredes do recipiente deixam passar a água mas retêm os sedimentos, podendo a rede ser suficientemente larga para reter somente a fracção mais grossa dos sedimentos transportados por arrastamento, http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/sedim/e_bed.htm.

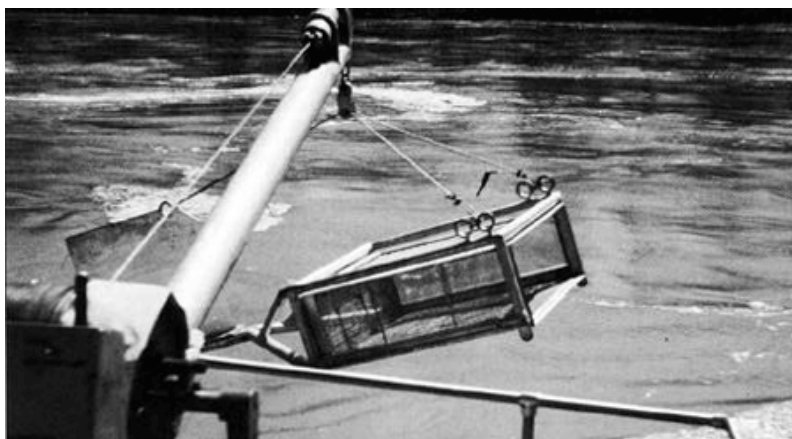


Fig.3.8 – Amostrador para recolha de sedimentos transportados por arrastamento (http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/sedim/e_bed.htm).

Geralmente as amostras de sedimentos transportados em suspensão são recolhidas durante um intervalo de tempo finito, baixando o amostrador até ao leito e elevando-o até à superfície a velocidade constante. Durante esta operação a velocidade na agulheta de entrada deverá ser igual à velocidade

local da corrente em todos os pontos da vertical segundo a qual a amostra é recolhida, pois só assim a concentração de sedimentos na amostra será igual à concentração de sedimentos na corrente local, Støle (2008).

A figura 3.9 mostra o amostrador de Nilsson, também conhecido por amostrador de sedimentos Sueco, que pode ser utilizado a partir de velocidades tão baixas quanto 16cm/s, por exemplo, <http://lindorm.com/products/nilsson.php>.



Fig.3.9 – Amostrador de Nilsson para recolha de sedimentos transportados em suspensão (<http://lindorm.com/products/nilsson.php>).

Existem três métodos diferentes de recolher este tipo de amostras, o método do incremento equitativo de largura em que a secção transversal do rio é dividida em iguais incrementos de largura e as amostras são recolhidas na vertical do ponto médio do troço entre dois incrementos, o método do incremento equitativo de caudal que é em tudo igual ao anterior apenas os incrementos são definidos através do caudal e não da largura, e o método da amostra vertical singular em que só uma amostra é recolhida na vertical do ponto onde se verifica a concentração de sedimentos média.

Estas amostras podem ainda ser recolhidas em qualquer ponto da secção durante um intervalo de tempo finito controlado por uma válvula que abre e fecha.

Têm vindo a ser desenvolvidas tecnologias para monitorizar continuamente os sedimentos prometendo substituir os métodos tradicionais de obtenção de dados que requerem uma rotina de recolha e análise de amostras, contudo nenhuma dessas tecnologias tem sido completamente bem sucedida em cobrir a gama de concentrações e tamanho de partículas requeridos. Uma vez aptas a ser aplicadas, estas tecnologias terão o potencial de revolucionar a monitorização fluvial de sedimentos representando uma solução mais segura, consistente, precisa e barata de obtenção de dados para a gestão mundial dos recursos sedimentares, Støle (2008).

A fiabilidade do cálculo do volume de sedimentos e distribuição granulométrica está directamente relacionada com a fiabilidade da análise laboratorial. A fim de manter a fiabilidade e consistência da análise laboratorial existem instruções e procedimentos para o controle de qualidade que fornecem metodologias e procedimentos para o registo das amostras, o registo dos dados durante a operação das amostras, a determinação sistemática da concentração dos sedimentos, etc.

A concentração de sedimentos pode ser analisada através de dois métodos: o método da filtração e o método da evaporação. O método da filtração consiste na separação da amostra em duas fracções (areia e componentes finos) através do peneiro 0,0625 mm, em que a fracção mais fina é filtrada através de uma membrana filtro de 0,45 µm conectada a uma bomba de vácuo. Este método é mais rápido e mais apropriado para concentrações inferiores a 10000 ppm. O método da evaporação consiste em deixar depositar os sedimentos no fundo do recipiente da amostra, decantar o líquido superficial, lavar os sedimentos para um disco de evaporação e secar o disco numa estufa. Este método requer maior supervisão e é utilizado frequentemente para concentrações superiores a 10000 ppm para sedimentos constituídos fundamentalmente por areia, Støle (2008).

A distribuição granulométrica de partículas de grandes tamanhos ou tamanhos intermédios pode ser analisada por medição directa. No caso de grandes partículas como rochas ou calhaus, a determinação

pode ser feita directamente através da medição da circunferência e diâmetro ou por imersão (determinação do volume de água deslocado). No caso de partículas intermédias, como cascalhos ou areias a determinação pode efectuar-se semi-directamente através de peneiros (este método falha na indicação de propriedades hidráulicas relacionadas com a forma das partículas). Para partículas de tamanhos inferiores a distribuição granulométrica poderá obter-se recorrendo a métodos de sedimentação. Dois exemplos deste tipo de métodos são a utilização do tubo de acumulação visual (fig.3.10) utilizado só para areias e a difracção a laser (fig.3.11) utilizada somente na gama de 0,4 a 2000 μm . O primeiro opera como um sistema estratificado onde as partículas são introduzidas a partir da mesma fonte e começam a ficar estratificadas no fundo do tubo de acordo com as suas velocidades de deposição, o aparelho possui um tubo de deposição e um mecanismo de registo. Num dado instante os sedimentos de determinado tamanho que chegam ao fundo do tubo são mais finos que os que se depositaram previamente e maiores dos que permanecem em suspensão. É um método rápido, económico e preciso que permite avaliar as propriedades hidráulicas e o diâmetro de queda das partículas, Støle (2008).

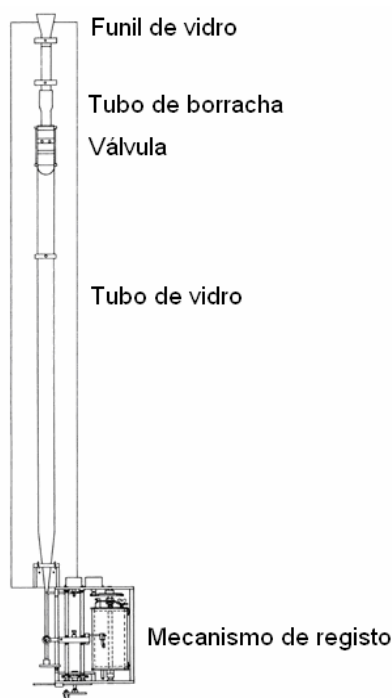


Fig.3.10 – Tubo de acumulação visual (<http://www.rickly.com/sai/VASTA99.htm>).



Fig.3.11 – Difractor a laser Coulter LS230

(<http://www.kitmondo.com/images%5Clisting%5CBeckmann%20Coulter.jpg>).

O manuseamento das amostras recolhidas exige determinados cuidados, visto que não devem ser transferidas do amostrador para outro recipiente, devendo ser registado o nível de água, a temperatura, a precipitação e a cor do rio no local de recolha da amostra. As garrafas com a amostra depois de seladas devem ser transportadas para o laboratório em caixas especiais e todas as amostras devem ser analisadas dentro de duas semanas após a recolha da amostra.

A frequência da amostragem é ditada pelo estudo em causa. Como referência genérica poderá adoptar-se uma elevada frequência na época que antecede as cheias, uma frequência regular na época das cheias e uma baixa frequência na época seca, considerando-se uma frequência regular 2 ou 3 amostragens por dia, uma vez que se espera que duas amostras independentes por dia traduzam uma imagem verdadeira do transporte de sedimentos no rio ao longo do tempo, Støle (2008).

O transporte de sedimentos no rio varia muito de ano para ano, e a maior parte do transporte ocorre durante a época das cheias, geralmente verificam-se elevadas concentrações de sedimentos durante pequenas cheias que antecedem a época das grandes cheias.

A qualidade dos dados disponíveis é muitas vezes questionável, existem alterações rápidas e imprevistas no caudal de água, assim como na concentração de sedimentos em suspensão. A taxa de transporte por arrastamento junto ao leito é praticamente impossível de medir. Uma grande quantidade de sedimentos pode passar despercebida quando a frequência de amostragem é fraca, Støle (2008).

3.2. MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE SEDIMENTOS DEPOSITADOS EM ALBUFEIRAS

3.1.1. INTRODUÇÃO

A análise do assoreamento deve integrar a fase de projecto de uma barragem, com vista à correcta colocação dos órgãos de tomada de água, prevenindo eventuais dificuldades de operação, ou mesmo interrupções no aprovisionamento da água. A análise da operação a longo prazo da barragem deve atender à evolução temporal dos eventuais assoreamentos, e das suas implicações no volume de água armazenada, uma vez que o aumento do volume do assoreamento pode implicar uma diminuição do volume de água utilizável.

Têm sido desenvolvidos diversos métodos para a quantificação dos sedimentos depositados nas albufeiras, com base nos princípios fundamentais da hidráulica e dos processos de sedimentação. Existem três diferentes tipos de metodologias que se podem adoptar:

- modelos matemáticos e físicos;
- amostragem de sedimentos e medição de caudais;
- levantamentos batimétricos.

3.1.2. MODELOS MATEMÁTICOS E FÍSICOS

Devido à grande heterogeneidade dos factores intervenientes na erosão e transporte de sedimentos, só modelos muito sofisticados permitiriam um cálculo eficiente de estimativas da erosão e transporte de sedimentos. Por isso, na maior parte dos estudos prévios, e dos projectos de aproveitamentos hidráulicos, só têm sido utilizados modelos muito simples, em geral fórmulas e equações gerais. Se não houver uma rede de medição, a estimativa dos sedimentos afluentes a uma secção de um rio pode ser feita de um modo teórico através do cálculo da erosão específica (por unidade de área e intervalo

de tempo), cujo valor permite, depois de multiplicado pela área da bacia e pelo intervalo de tempo desejado, a obtenção da quantidade total de sedimentos erodidos e transportados.

Um exemplo deste tipo de metodologia é a equação universal de erosão do solo, deduzida empiricamente pelo “United States Soil Conservation Service”, a partir de cerca de 10 000 medições realizadas nas mais diversas condições de solos e chuvas:

$$A = RKLSCP \quad (3.18)$$

em que A representa a perda de solo em toneladas por hectare e por ano, R o factor energético da chuva, K o factor de erodibilidade do solo, L o factor de comprimento, S o factor de inclinação, C o factor de técnica cultural e P o factor de práticas de conservação, Lencastre e Franco (2006).

O factor energético da chuva, R , expresso em kW.cm/ha, pode ser determinado pela fórmula:

$$R = \sum_{i=1}^n E_i I_{30i} \quad (3.19)$$

em que E representa a energia de uma chuvada de intensidade I e de altura h e I_{30} a intensidade da chuvada de 30 minutos mais intensa, ocorrida durante a chuvada em causa e expressa em cm/h.

A energia de uma chuvada, E , em kWh/ha, pode ser determinada pela expressão:

$$E = (0,572 + 0,242 \log I)h \quad (3.20)$$

O factor de comprimento, L (adimensional) é a relação entre a perda de solo ao longo do comprimento real e a que, em iguais condições, ocorreria numa distância de 25 m. Este factor pode ser determinado por:

$$L = (\lambda / 25)^{0,5} \quad (3.21)$$

em que λ representa a distância entre o início do escoamento superficial e a mudança de inclinação do terreno, ou outra causa de interrupção do escoamento da lâmina de água superficial, medida segundo o máximo declive em metros.

O factor de inclinação, S (adimensional) é a relação entre a erosão no terreno real e no terreno com inclinação de 10 %, nas mesmas condições. Este factor pode ser obtido pela expressão:

$$S = (0,043s^2 + 0,30s + 0,43) / 7,73 \quad (3.22)$$

em que s é a inclinação do terreno em percentagem.

O factor de técnica cultural, C assume valores entre 0 e 1, adimensionais, consoante o solo está completamente coberto ou completamente nu. O valor de C pode ser obtido através do quadro 3.1. Como este valor pode variar com as estações e rotações culturais, deve ser considerado um valor médio, aplicando a expressão:

$$C = \sum C_i R_i \quad (3.23)$$

O factor de práticas de conservação, P é da mesma natureza do anterior e pode ser obtido através do quadro 3.2.

Os valores do factor de erodibilidade do solo, K expressos em t/kW.cm, foram obtidos experimentalmente e podem retirar-se do ábaco da figura 3.12, Lencastre e Franco (2006).

Quadro 3.1 – Factores de técnica cultural para equação universal do solo (Lencastre e Franco (2006)).

A – Culturas agrícolas								
Cultura		Fase de desenvolvimento						
		Alqueive	Sementeira	Emergência	Máximo desenvolvimento	Restolho		
Milho com lavoura convencional, em rotação com pastagens cultivadas		0,36	0,63	0,50	0,26	0,30		
Luzerna							0,02	
B - Florestas								
Copas das árvores (% da área)	% de área coberta por manta morta com mais de 5 cm de espessura	Sob-coberto					C	
100-75	100-90	Moderadamente pastado e queimado					0,001	
		Intensamente pastado e queimado					0,003-0,011	
70-40	80-75	Moderadamente pastado e queimado					0,002-0,004	
		Intensamente pastado e queimado					0,01-0,04	
35-20	70-40	Moderadamente pastado e queimado					0,003-0,009	
		Intensamente pastado e queimado					0,02-0,09	
<20		Considerado como cultura agrícola ou pastagem						
C - Pastagens naturais e incultos								
Tipo de coberto e altura média de queda das gotas de água, após terem sido intersectadas	% de área sob coberto	Revestimento do solo (*)	% de solo revestido					
			0	20	40	60	80	95-100
Sem coberto apreciável		E	0,45	0,20	0,10	0,042	0,013	0,003
		L	0,45	0,24	0,15	0,090	0,043	0,011
Coberto de ervas altas ou mato rasteiro (0,5 m de queda média)	25	E	0,36	0,17	0,09	0,038	0,012	0,003
		L	0,36	0,20	0,13	0,082	0,041	0,011
	50	E	0,26	0,13	0,07	0,035	0,012	0,003
		L	0,26	0,16	0,11	0,075	0,039	0,011
	75	E	0,17	0,10	0,06	0,031	0,011	0,003
		L	0,17	0,10	0,06	0,031	0,011	0,003
Mato denso (2m de queda média)	25	E	0,40	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
		L	0,40	0,22	0,14	0,085	0,042	0,011
	50	E	0,34	0,16	0,085	0,038	0,012	0,003
		L	0,34	0,19	0,13	0,081	0,041	0,011
	75	E	0,28	0,14	0,08	0,036	0,012	0,003
		L	0,28	0,17	0,12	0,077	0,040	0,011
Árvores, mas com pouco mato rasteiro (4m de queda média)	25	E	0,42	0,19	0,10	0,041	0,013	0,003
		L	0,42	0,23	0,14	0,087	0,042	0,011
	50	E	0,39	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
		L	0,39	0,21	0,14	0,085	0,042	0,011
	75	E	0,36	0,17	0,09	0,039	0,012	0,003
		L	0,36	0,20	0,13	0,083	0,041	0,011
(*) E - Revestimento constituído por ervas ou manta morta com pelo menos 5 cm de espessura.								
L - Revestimento constituído por plantas herbáceas de folha larga (infestantes).								

Quadro 3.2 – Factores de práticas de conservação para equação universal do solo (Lencastre e Franco (2006)).

Inclinação da superfície %	Práticas de conservação do solo		
	Cultivo em curvas de nível	Cultivo em faixas	Cultivo em terraços
2 - 7	0,50	0,25	0,10
8 - 12	0,60	0,30	0,12
13 - 18	0,80	0,40	0,16
19 - 24	0,90	0,45	0,18

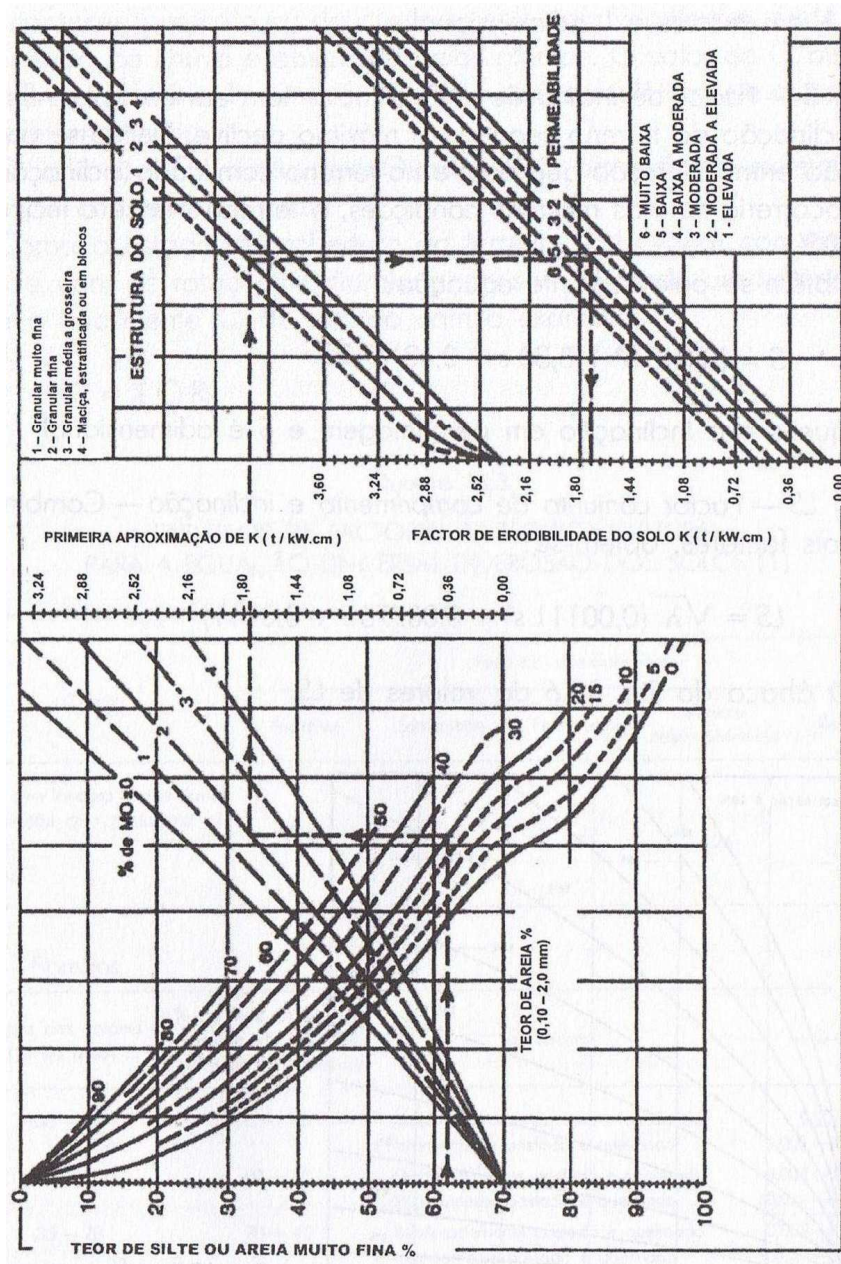


Fig.3.12 – Ábaco para determinação do factor de erodibilidade do solo, retirado de Lencastre e Franco, 2006.

Para além desta existem outras fórmulas, referidas por Støle enquanto docente para a determinação da produção de sedimentos, tais como:

$$S = 11,8 \cdot (Q_{sup} \cdot q_{pico} \cdot A_{bh})^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot G \quad (3.24)$$

em que S representa a quantidade de sedimentos produzida diariamente em toneladas, Q_{sup} o volume de precipitação em mm/ha, q_{pico} o caudal de pico em m³/s, A_{bh} a área da bacia hidrográfica, K o factor de erodibilidade do solo, LS o factor topográfico, G o factor de fragmentos grossos C o factor de cobertura do solo e P o factor de práticas de controlo da erosão.

$$S_a = 0,02 P^{0,6} F_e^{-1,7} S^{0,25} D_d^{0,10} \left(\frac{P_{max}}{P} \right)^{0,09} \quad (3.25)$$

em que S_a representa a quantidade de sedimentos produzidos anualmente em cm da área total da bacia hidrográfica, S o declive médio da bacia hidrográfica, P a precipitação anual média em cm, D_d a densidade de drenagem em km⁻¹, P_{max} a precipitação mensal média máxima e F_e pode ser determinado pela expressão:

$$F_e = \frac{1}{A} [0,8a_f + 0,6a_e + 0,3a_a + 0,1a_r] \quad (3.26)$$

em que A representa a área total da bacia hidrográfica que é a soma de a_f , a área florestal, a_e , a área coberta com ervas rasteiras, a_a a área arável e a_r a área superficial de resíduos.

Estas fórmulas permitem estimar a quantidade de sedimentos resultantes dos processos de erosão que atingem determinado curso de água em determinada secção, estes dados necessitam de ser tratados a fim de se obter a quantidade de sedimentos que se deposita nas albufeiras. Uma hipótese será recorrer à curva de Brune que se apresenta na secção 3.1.3.

Pode ainda recorrer-se a ferramentas de simulação como o Soil and Water Assessment Tool “SWAT”, o HBV-SED ou o SEDEM “Sediment Deliver Model”.

3.1.3. AMOSTRAGEM DE SEDIMENTOS E MEDIÇÃO DE CAUDAIS

A quantidade de sedimentos depositados numa albufeira pode ser determinada com base no conhecimento da eficiência de retenção da barragem e da quantidade de sedimentos transportada pelo rio.

A eficiência de retenção de uma albufeira depende de factores como o tamanho dos grãos transportados que podem assumir as mais diversas dimensões (fig.3.13), a forma da albufeira e o modo de operação da barragem. A curva de Brune é um método muito utilizado para determinar a eficiência de retenção de uma albufeira em função da sua capacidade e do volume de água anual afluente (fig.3.14). O caudal de água de um grande rio passa tão rapidamente por uma pequena barragem que um grande número de partículas mais ou menos finas não têm tempo de se depositar e transpõem a barragem, enquanto que se o caudal de água do mesmo rio se deparar com uma albufeira com capacidade para o reter durante vários anos, quase todos os sedimentos em suspensão terão possibilidade de se depositar. Deste modo, a eficiência de retenção de uma albufeira diminui com tempo à medida que a respectiva capacidade se reduz, Støle (2008). As seguintes equações logarítmicas traduzem uma aproximação à curva de Brune:

$$ER = 165 + 60 \log \left(\frac{C_r}{Qma} \right) \quad \text{se } 0.002 < \frac{C_r}{Qma} \leq 0.01 \quad (3.27)$$

$$ER = 129 + 42 \log \left(\frac{C_r}{Qma} \right) \quad \text{se } 0.01 < \frac{C_r}{Qma} \leq 0.1 \quad (3.28)$$

$$ER = 97.5 + 10.5 \log \left(\frac{C_r}{Qma} \right) \quad \text{se } 0.1 < \frac{C_r}{Qma} \leq 1 \quad (3.29)$$

$$ER = 97.5 \quad \text{se } \frac{C_r}{Qma} \geq 1 \quad (3.30)$$

em que ER representa a eficiência de retenção, C_r a capacidade da albufeira e Qma a afluência média anual de água à albufeira, Batura e Jordaan (2000).



Fig.3.13 – Sedimentos de grandes dimensões retidos numa albufeira (Støle (2008)).

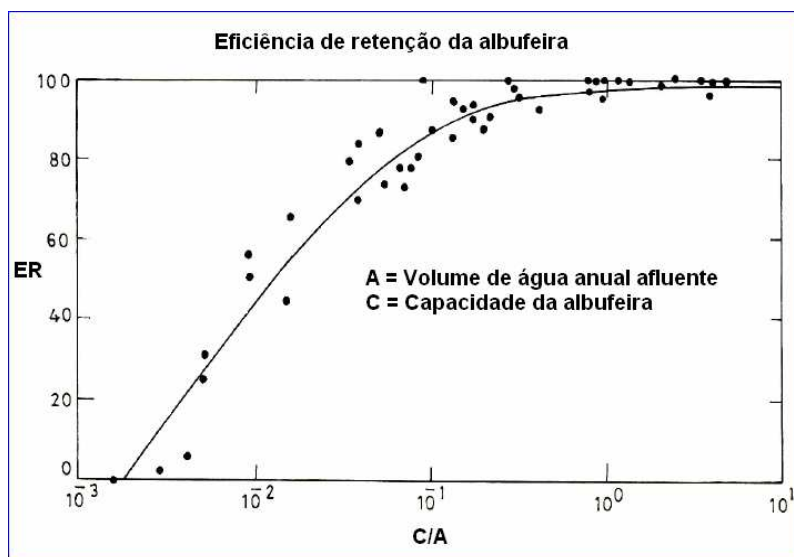


Fig.3.14 – Curva de Brune (Støle (2008)).

A abordagem convencional para determinar a quantidade de sedimentos transportada num rio, é medir a concentração de sedimentos suspensos na corrente do rio sobe vários regimes de escoamento. As concentrações observadas de sedimentos suspensos são posteriormente estudadas em função do caudal e dos parâmetros da bacia hidrográfica. Baseado numa relação entre o caudal e a concentração de sedimentos específica do local, a quantidade total de sedimentos do rio poderá ser determinada. Esta será uma abordagem razoável se:

- os sedimentos em suspensão representarem 75 % ou mais do total de sedimentos transportados;
- o deslize de terras assumir um papel minoritário nos mecanismos de fornecimento de sedimentos;
- os tamanhos das partículas do leito e das partículas transportadas forem da mesma ordem de grandeza.

A quantidade total de sedimentos transportada por um rio montanhoso muito inclinado durante a época das cheias é, contudo, normalmente limitado pelo fornecimento de sedimentos ao rio e não pela capacidade hidráulica de transporte de sedimentos do rio. As fórmulas de transporte de sedimentos aplicadas a rios montanhosos durante as cheias fornecem uma estimativa elevada do transporte de sedimentos que não é realista. Para além disso a flutuação na concentração anual de sedimentos é muito superior à variação da precipitação anual. Poderá portanto ser complicado encontrar qualquer correlação entre a quantidade de sedimentos e os parâmetros hidrológicos e hidráulicos, Støle (2008).

Uma vez conhecidos os valores das concentrações de sedimentos e dos caudais de um determinado rio em dois momentos diferentes e a eficiência de retenção de determinada barragem do mesmo rio, pode obter-se a quantidade de sedimentos depositados na albufeira recorrendo à seguinte expressão:

$$S_{RA1-2} = \frac{(t_2 - t_1)}{2} \left[(Q_1 C_{f1} + Q_2 C_{f2}) \frac{ER_f}{100} + (Q_1 C_{a1} + Q_2 C_{a2}) \frac{ER_a}{100} \right] \frac{3600}{10^6} \quad (3.31)$$

em que S_{RA1-2} representa a quantidade de sedimentos que ficam retidos na albufeira em toneladas, Q o caudal afluente, C_f e C_a representam respectivamente a concentração de finos e da fracção de areia em ppm, ER_f e ER_a representa respectivamente a eficiência de retenção da fracção fina e da fracção de areia em percentagem, Støle, (2008).

3.1.4. LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS

Para os primeiros levantamentos batimétricos (no fim do século XIX) era utilizado um peso atado a um cabo. Quando o peso tocava o fundo da albufeira, um sino tocava no barco e a leitura do cabo dava a profundidade, Bircher, 1952, por Spreafico e Grasso (2003). Desde aproximadamente 1940, as ferramentas ultra sónicas passaram a ser usadas, o barco estava equipado com um transmissor e um sensor de ondas ultra sónicas curtas. A profundidade do ponto de pesquisa era dada pelo tempo necessário para a onda sónica percorrer o dobro da distância entre o barco e o fundo da albufeira, Walser, 1952, por Spreafico e Grasso (2003).

A técnica para determinar as coordenadas (X,Y) dos pontos de medição tem melhorado ao longo do tempo. No início era usado um arame de aço escalonado suspenso 2 ou 3 metros abaixo do nível de água da albufeira através de flutuadores. Depois disso utilizou-se o teodolito, depois as ondas rádio e o laser infravermelho, Spreafico e Grasso (2003).

O sistema utilizado actualmente combina, em tempo real, as medidas de posicionamento, determinadas através do GPS (Global Position System – Sistema de Posicionamento Global) e as leituras de profundidade provenientes de sondas hidrográficas. Esta combinação permite obter um conjunto de pontos, referenciados geograficamente, a partir dos quais se estimam as superfícies do fundo das albufeiras. A sincronização de informação entre o GPS e a sonda hidrográfica é obtida recorrendo a um software de navegação que correlaciona e guarda correctamente os dois tipos de medições (posição e profundidade) e permite também assegurar que a informação recolhida coincide com informação previamente existente através da definição de um plano de navegação. Para definir o plano de navegação será necessário a existência de sinal rádio entre duas antenas, uma de referência e outra móvel, Fernandes *et al.* (2002).

Para se obter um levantamento com posições precisas (erros de 2 a 3 centímetros) é necessário:

- um número mínimo de 5 satélites, com uma geometria favorável, ou seja, bem distribuídos relativamente ao utilizador;
- não ocorrerem perdas de sinal nos primeiros 4 a 5 minutos do movimento para permitir a resolução de ambiguidades;
- que a distância entre receptores (referência e móvel) não seja superior a 10 km.

A metodologia utilizada para monitorização batimétrica em albufeiras inclui uma sucessão de etapas de gabinete e campo que passam pela preparação do levantamento, a execução do levantamento e, o processamento dos dados e cálculo das superfícies batimétricas.

Adicionalmente, para cada albufeira, é necessário digitalizar os levantamentos batimétricos já existentes e obter informação topográfica da área envolvente à albufeira não contemplada no levantamento batimétrico, Fernandes *et al.*, 2002.

A fim de determinar as quantidades de sedimentos depositadas é necessário que ocorra um certo intervalo de tempo entre os levantamentos. Este intervalo depende da variação de sedimentos transportados pelo rio e da superfície onde os sedimentos se depositam.

O INAG, Instituto da água, possui equipamento para a realização deste tipo de levantamentos, figura 3.15.



Fig.3.15 – Equipamento do INAG (retirado de Álvares *et al.* (2000)).

4

ANÁLISE DO CASO PORTUGUÊS E METODOLOGIAS DE APROVEITAMENTO DOS SEDIMENTOS

4.1. METODOLOGIAS DE CONTROLO E EXTRACÇÃO DE SEDIMENTOS

4.1.1. INTRODUÇÃO

O controlo da deposição de sedimentos, é um dos principais objectivos dos engenheiros responsáveis quer pelo planeamento e projecto quer pela operação, com vista a preservar e estender, se e quando possível, a vida útil das albufeiras, e a reduzir os efeitos adversos para níveis razoáveis.

Toda a estratégia de controlo da sedimentação nas albufeiras deverá assumir que prevenir é melhor do que curar, o que significa que a prevenção da sedimentação das albufeiras através de qualquer método é técnica e economicamente mais efectiva do que as técnicas utilizadas para remover os sedimentos depois da sua deposição e consolidação, Bатуca e Jordaan (2000). Os impactos ecológicos graves, como o baixo conteúdo de sedimentos na água restituída a um rio a jusante de uma barragem, deveriam ser considerados como custos elevados na análise de custos-benefícios dos projectos das grandes barragens. Portanto o recurso a sistemas de manutenção do transporte de sedimentos num rio, transferindo para jusante da barragem parte do caudal sólido, representaria um ganho na globalidade dos custos indirectos de um projecto (pela redução do investimento necessário em obras de defesa costeira, por exemplo).

Existem três estratégias principais de gestão dos sedimentos dentro das albufeiras:

- Minimizar a afluência de sedimentos;
- Minimizar a deposição;
- Remover os sedimentos acumulados.

4.1.2. MINIMIZAÇÃO DA AFLUÊNCIA DE SEDIMENTOS

A minimização da afluência de sedimentos a uma albufeira pode ser obtida através de:

- Medidas não estruturais de conservação do solo, reduzindo a produção de sedimentos na bacia hidrográfica;

- Medidas estruturais de conservação do solo, reduzindo a quantidade de sedimentos que são transportados até ao rio;
- Estruturas e trabalhos hidráulicos que desviam os sedimentos transportados pelo rio para um ponto a jusante da barragem em alternativa à passagem pela albufeira.

As medidas não estruturais de conservação do solo compreendem o aumento da vegetação nas encostas da bacia hidrográfica. Os trabalhos de florestação podem ser extremamente benéficos para a estabilização do solo, redução da erosão e retenção de materiais sedimentários, quando utilizadas espécies de árvores e ervas adequadas. Estas medidas são uma forma efectiva e económica de protecção das encostas de uma bacia hidrográfica contra a erosão que podem contribuir significativamente para a redução da afluência de sedimentos a uma albufeira e são aplicáveis tanto a bacias hidrográficas pequenas como grandes.

As medidas estruturais de conservação do solo compreendem a construção de barreiras de retenção de sedimentos, frequentemente utilizadas, que, quando são devidamente projectadas e construídas, podem ser efectivas na retenção dos sedimentos, mas à escala das grandes bacias hidrográficas podem deixar de ser atractivas do ponto de vista do seu custo, Batuca e Jordaan (2000).

Estas medidas de conservação do solo, ao contribuírem significativamente para a redução da quantidade de sedimentos transportados pelos rios, não apresentam solução para a outra face do problema em estudo, o esgotamento das fontes de sedimentos que iriam alimentar as praias.

O desvio dos sedimentos transportados pelo rio para um ponto a jusante da barragem, utilizando um esquema de “bypass” em alternativa à albufeira, constitui uma solução não só para o problema da deposição nas albufeiras mas também para o problema da erosão que se faz sentir nos troços de rio a jusante das barragens. Esta alternativa compreende os seguintes trabalhos hidráulicos no rio:

- Barragens secundárias de retenção dos sedimentos a montante da albufeira;
- Estruturas de desvio dos sedimentos;
- Estruturas de restituição directamente a jusante da barragem principal.

A retenção dos sedimentos no rio principal e nos seus afluentes a montante de uma albufeira, através da construção de barragens secundárias constitui uma das mais importantes práticas de engenharia de redução da quantidade de sedimentos afluentes e de retardar a formação de deltas. Estes trabalhos são tecnicamente muito eficientes, mas só são económica e ambientalmente atractivos sob algumas condições particulares. Geralmente, estas albufeiras secundárias são muito mais pequenas do que a albufeira principal e como estão localizadas a montante da albufeira são as primeiras a absorver o impacto dos sedimentos vindos da bacia hidrográfica a montante e, consequentemente, ficam preenchidas por sedimentos mais rapidamente do que a albufeira principal. Por esta razão estas albufeiras têm uma vida relativamente curta o que contrapõe à sua viabilidade económica.

Actualmente existe uma grande variedade de estruturas de desvio de sedimentos, tais como canais abertos, túneis e galerias, condutas, etc. A selecção da estrutura mais adequada depende principalmente do comprimento e configuração da albufeira, da topografia local, da geologia (qualidade das rochas), da hidrologia e hidráulica do rio (cheias, concentração de sedimentos), entre outros factores.

Quando devidamente projectadas, estas estruturas são muito eficientes, podendo, no entanto, aparecer algumas dificuldades durante a operação que aumentam o custo de manutenção destes sistemas, como por exemplo a abrasão do betão ou o preenchimento das estruturas de desvio pelos sedimentos e detritos.

O desvio de sedimentos através de canais abertos é uma solução cara, mas a opção de túneis e galerias é ainda mais cara e só é aplicável a albufeiras pequenas e quando não são possíveis soluções alternativas. As condutas não são tão utilizadas no desvio permanente dos sedimentos, aplicando-se mais no desvio de sedimentos previamente removidos através de outras técnicas como a dragagem, Batuca e Jordaan (2000).

Muito provavelmente, um dos maiores canais abertos de desvio de sedimentos no mundo é o All-American Canal, no rio Colorado, no estado da Califórnia nos EUA, figura 4.1. Foi completado em 1938, tem um comprimento total de 128 km e uma capacidade de $430 \text{ m}^3/\text{s}$. A secção transversal é trapezoidal com 50 m de largura no fundo e 70 m à superfície e com 6,3 m de profundidade, Batuca e Jordaan (2000).



Fig.4.1 – All-American Canal, no rio Colorado, no estado da Califórnia nos EUA (http://www.allposters.co.uk/-sp/The-All-American-Canal-as-the-Blazing-Sun-Sets-in-the-West-near-Yuma-Arizona-Posters_i3991549_.htm).

Um dos primeiros sistemas de desvio de sedimentos com uma galeria de desvio de 305 m foi construído na albufeira Amsteg com uma capacidade de armazenamento de apenas $0,197 \text{ hm}^3$, construído em 1922 no rio Reuss na Suíça, figura 4.2. A capacidade de transporte da galeria era de $221 \text{ m}^3/\text{s}$, com uma secção transversal activa de $20,9 \text{ m}^2$. Três anos depois da entrada em operação não existia sedimentação na bacia da albufeira, (Reed, 1931, por Batuca e Jordaan (2000)).

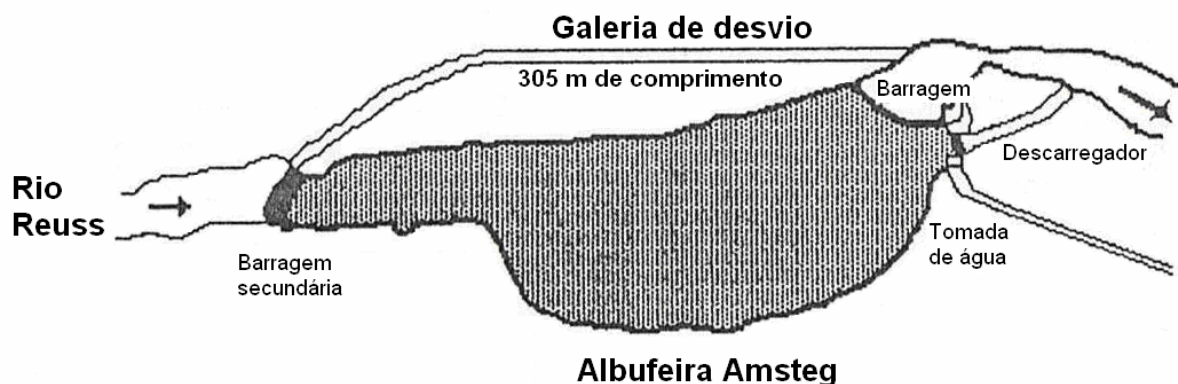


Fig.4.2 – Sistema de passagem de sedimentos com galeria de desvio na albufeira Amsteg, no rio Reuss, na Suíça (adaptado de , Batuca e Jordaan (2000)).

Uma importante vantagem destes sistemas de desvio de sedimentos é o facto de não interferirem com a operação da albufeira. Contudo, em áreas áridas ou semi-áridas estes sistemas podem entrar em conflito com a necessidade de armazenamento de água. Quando as estruturas de desvio dos sedimentos são demasiadamente longas, esta alternativa pode deixar de ser atractiva economicamente.

Um importante problema ambiental que pode surgir com a implantação desta solução é o aumento da concentração de sedimentos a jusante da albufeira, Bатуca e Jordaan (2000).

Os sistemas de desvio de sedimentos podem ainda consistir numa albufeira de armazenamento fora do curso de água alimentada por gravidade ou por bombagem pelo rio principal.

As albufeiras de armazenamento fora de curso são uma variante destes sistemas, raramente utilizados, porque requerem condições favoráveis particulares de topografia, espaço disponível e tecnologia. Um raro exemplo de utilização desta variante é a albufeira Knellpoort de 137 hm³ de capacidade de armazenamento na Africa do Sul, que ficou pronta em 1988, figura 4.3. Esta albufeira funciona como um armazém de sedimentos fora de curso evitando problemas de sedimentação nas restantes albufeiras do sistema de água governamental do rio Caledon-Modder no qual está inserida, Bатуca e Jordaan (2000).

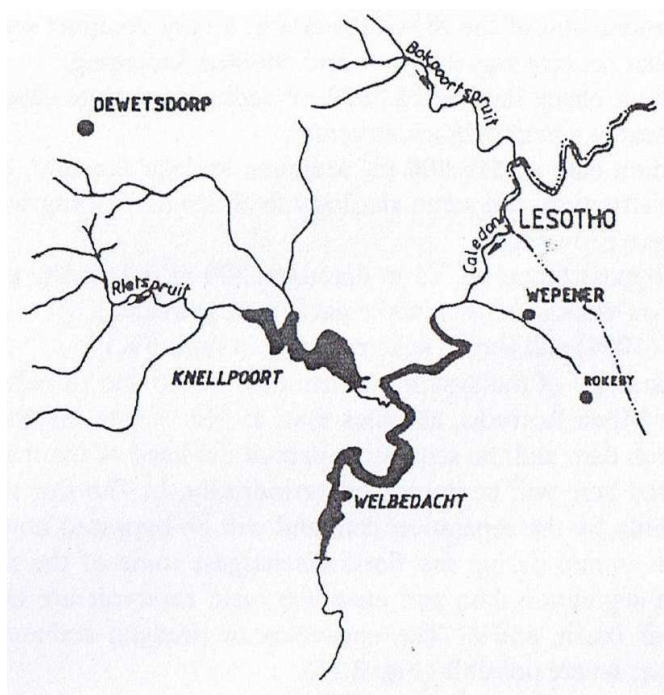


Fig.4.3 – Albufeira Knellpoort de armazenamento fora de curso na Africa do Sul, (Bатуca e Jordaan (2000)).

4.1.3. MINIMIZAÇÃO DA DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS

A minimização da deposição de sedimentos nas albufeiras, proporcionando-lhes a passagem para jusante da barragem o mais rapidamente possível, antes de se depositarem e consolidarem é uma das formas mais eficientes e em determinados casos, mais económicas, de preservar a capacidade de armazenamento das albufeiras, protegendo-as da sedimentação. As duas principais técnicas de minimização da deposição de sedimentos são:

- A passagem dos sedimentos (“sluicing”);

- A passagem das correntes de turbidez.

Estas técnicas baseiam-se em dois princípios fundamentais: é melhor, mais fácil e mais económico prevenir a ocorrência da sedimentação do que remedia-la após a deposição dos sedimentos e é muito mais fácil manter os sedimentos em suspensão do que erodi-los depois da sua deposição, especialmente quando estão consolidados, Mahmood (1987), Scheuerlein (1987), (1989), por Batuca e Jordaan (2000). A passagem dos sedimentos (“sluicing”) consiste em manter o volume de sedimentos afluentes em suspensão descarregando a grande maioria através da barragem antes de se poderem depositar no fundo da albufeira, reduzindo assim a eficiência de retenção da albufeira em causa e armazenando somente a água praticamente livre de sedimentos. Esta técnica é posta em prática pelas sucessivas operações de:

- Redução do nível de água de forma a acelerar a passagem dos sedimentos através da albufeira;
- Descarga dos sedimentos afluentes, através dos descarregadores, o mais rapidamente possível;
- Elevação do nível de água, a fim de satisfazer a função básica de armazenamento de água da albufeira.

A operação dos descarregadores não é contínua, estando limitada somente a uma parte do ano, normalmente durante o período de cheias. Na maioria dos casos o nível de água é mantido baixo durante a época das cheias, de forma a proporcionar uma suficiente capacidade de transporte através da albufeira. Depois da época das cheias o nível de água é elevado para armazenar água relativamente clara, Mahmood (1987), por Batuca e Jordaan (2000). A passagem dos sedimentos na época das chuvas é importante pois normalmente estas transportam sedimentos em grandes concentrações.

As concentrações de sedimentos transportados pela corrente tendem a variar muito durante uma única cheia, porque a precipitação inicial, especialmente depois de uma época de secas, encontra mais material transportável do que as precipitações subsequentes. As concentrações de sedimentos tendem, por isso também, a ser muito mais elevadas durante o período ascendente de cheias do que durante o período descendente. Na operação dos descarregadores de fundo é portanto inteligente adiar o início da retenção de forma a armazenar somente água que contem concentrações de sedimentos relativamente baixas, Basson e Rooseboom (1999).

Enquanto é possível remover, através da lavagem (“flushing”), sedimentos não coesivos muito tempo depois da deposição ter ocorrido, este não é o caso dos sedimentos altamente coesivos. Assim que os sedimentos coesivos tenham sido consolidados é praticamente impossível remover quantidades significativas de tais sedimentos das albufeiras, Basson e Rooseboom (1997, 1999). Os sedimentos depositados sobre as margens, na maioria dos casos, não podem ser removidos através da lavagem e portanto é imperativo que a sua deposição seja limitada pela passagem dos sedimentos. As velocidades requeridas para manter os sedimentos em suspensão são normalmente muito mais baixas do que as requeridas para erodir os sedimentos depositados, especialmente os sedimentos coesivos, Hu (1990), Basson e Rooseboom (1997, 1999). Isto significa que a passagem é mais eficiente para a remoção dos sedimentos, do que a lavagem ocasional.

O sucesso da descarga das primeiras cheias depende do seguinte:

- Excesso de afluência de água suficiente para descarregar sedimentos;
- Descarregador com abertura de capacidade adequada e localizado de preferência próximo do nível do leito original;

- No caso da existência de tomadas de água para produção hidroeléctrica um descarregador de fundo localizado de forma a limitar a sedimentação junto à tomada de água;
- Operação efectuada por operadores treinados (é muito importante e frequentemente a parte mais crítica das operações de descarga de sedimentos);
- Albufeira com configuração estreita do início ao fim;
- Rio com transporte sobretudo de sedimentos em suspensão;
- Regime hidrográfico previsível com confiança no local da barragem, a fim de encher a albufeira a tempo depois da operação dos descarregadores.

Idealmente seria preferível deixar passar cheias ainda maiores através da albufeira sem reduzir a sua velocidade, o que raramente é praticável ou económico, na maioria dos casos devido à necessidade de estruturas de restituição excessivamente largas e perda do benefício da albufeira. Como um compromisso Rooseboom (1985) propôs que afluências até um período de retorno de cinco anos deveriam poder passar pela albufeira sem depositar quantidades de sedimentos significativas, enquanto afluências mais elevadas tenderiam a depositar sedimentos mas estes depósitos acabariam por ser descarregados durante o período de cheias antes de serem consolidados, Basson e Rooseboom (1999). Este apenas será o caso de bacias com configurações estreitas. Em albufeiras largas os sedimentos depositar-se-ão nas margens durante grandes afluências e uma parte muito pequena de tais sedimentos serão removidos durante as cheias, Basson e Rooseboom (1999). Em tais albufeiras o equilíbrio da capacidade de armazenamento de longo termo será garantido pelo canal principal de descarga, figura 4.4.

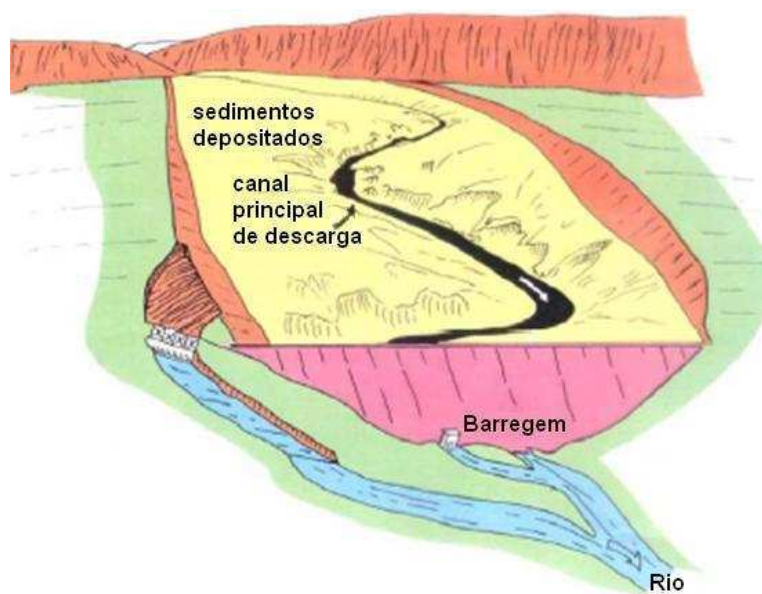


Fig.4.4 – Representação esquemática do processo de passagem de sedimentos ou “sluicing” (adaptado de Støle (2008)).

Uma vez tomada a decisão relativamente ao caudal de projecto a ser considerado, as condições críticas de transporte na albufeira têm de ser estabelecidas. Como a capacidade de transporte de sedimentos decresce na zona da água retida da albufeira, o transporte de sedimentos deixa de ser controlado pelo fornecimento de sedimentos, passando a ser controlado antes pela capacidade de transporte.

A regulação da precipitação e os requisitos para o controle de sedimentos numa albufeira estão frequentemente em conflito, especialmente em áreas semi-áridas. Portanto, a transferência de água de

albufeiras adjacentes pode ser uma solução para o controlo de sedimentos numa albufeira existente caso o projecto seja economicamente viável e a bacia dadora possua excesso suficiente de precipitação.

Como exemplo, o controlo de problemas de sedimentação da albufeira Sanmenxia no Rio Amarelo, na China em 1960, foi efectuado com recurso à passagem de sedimentos, Zhang Q. e Long Y. (1980), por Basson e Rooseboom (1999).

As correntes de turbidez são correntes densas e estratificadas com sedimentos em suspensão. A passagem destas correntes pode ser um método eficiente na redução da sedimentação nas albufeiras, no entanto só é aplicável quando e onde tais correntes de turbidez ocorrem, utilizando a sua elevada capacidade de transporte para passar os sedimentos através da albufeira para jusante da barragem.

As condições favoráveis à ocorrência de correntes de turbidez são:

- Rio com características adequadas, tais como elevada inclinação do leito e caudais afluentes com grandes concentrações de sedimentos;
- Albufeira com morfologia adequada (estreita, configuração tipo 4 – vale encaixado, fig.4.5, fundo inclinado);
- Hidráulica da albufeira adequada (elevadas profundidades e reduzidas velocidades de escoamento).

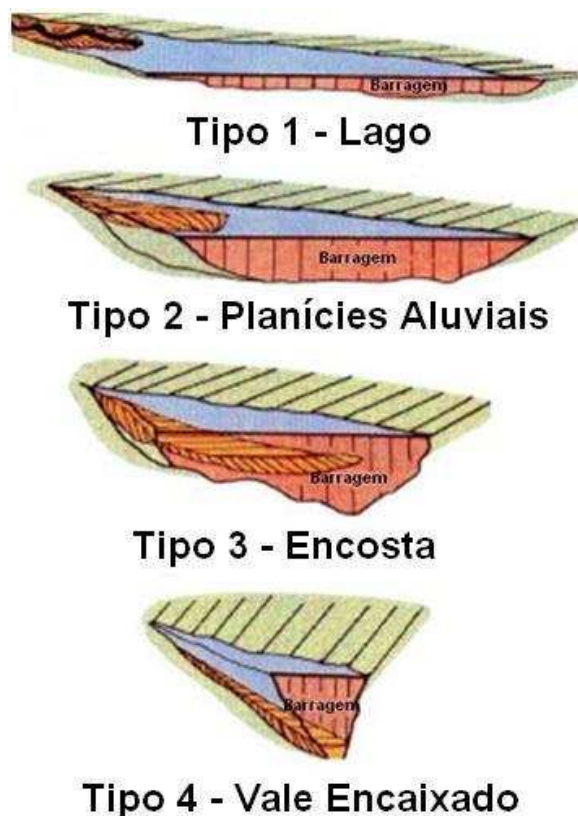


Fig.4.5 – Diferentes formas de albufeiras (adaptado de Støle, 2008).

Quando as correntes de turbidez ocorrem, elas movem-se graviticamente ao longo da albufeira até ao local da barragem escalando-a até uma determinada altura e depois caem, figura 4.6. Caso a estrutura

da barragem inclua descarregadores ou uma cortina, então as correntes de turbidez podem ultrapassar a barragem eficazmente, figura 4.7, Bатуca e Jordaan (2000).

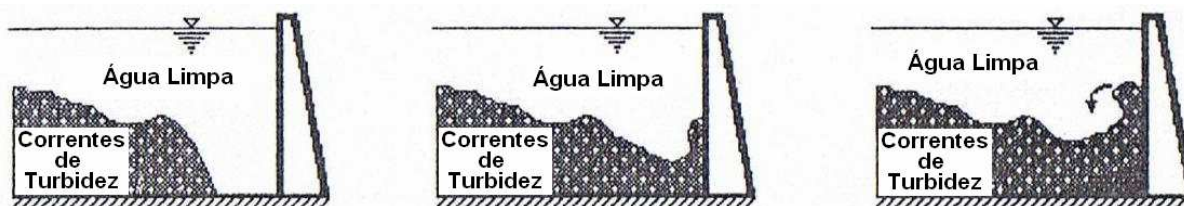
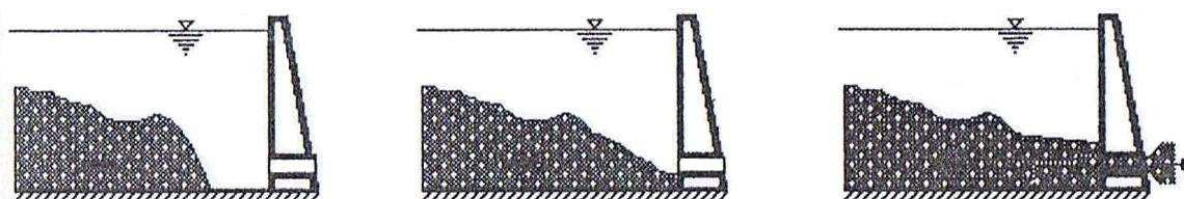


Fig.4.6 – Movimento das correntes de turbidez numa albufeira (adaptado de Bатуca e Jordaan (2000)).



a) Barragem com descarregador de fundo

b) Barragem com cortina

Fig.4.7 – Passagem das correntes de turbidez através da barragem, (adaptado Bатуca e Jordaan (2000)).

O principal benefício da passagem das correntes de turbidez é não necessitar de descer o nível de água na albufeira durante a operação. Por outro lado, a principal falha do método é a necessidade de consumo permanente de uma quantidade de água relativamente elevada (como a maioria dos métodos hidráulicos), o que poderia entrar em conflito com a necessidade de armazenamento de água principalmente nas áreas áridas e semi-áridas Bатуca e Jordaan (2000).

4.1.4. REMOÇÃO DOS SEDIMENTOS ACUMULADOS

Apesar das medidas para controlar o processo erosivo nas bacias hidrográficas e o transporte de sedimentos através do rio (medidas de conservação do solo, reflorestação e reforço da cobertura vegetal permanente do solo) é óbvio que uma grande quantidade de sedimentos continua a alcançar as albufeiras. As medidas de minimização da deposição de sedimentos, ou porque nem sempre são aplicadas, ou porque podem não ser suficientemente eficazes em determinados casos podem permitir que a deposição dos sedimentos ocorra. O potencial que tais sedimentos apresentam para serem reutilizados conduz à necessidade de saber como os remover das albufeiras.

As principais técnicas de remoção de sedimentos de uma albufeira podem agrupar-se de acordo com o tipo de sedimentos, quadro 4.1.

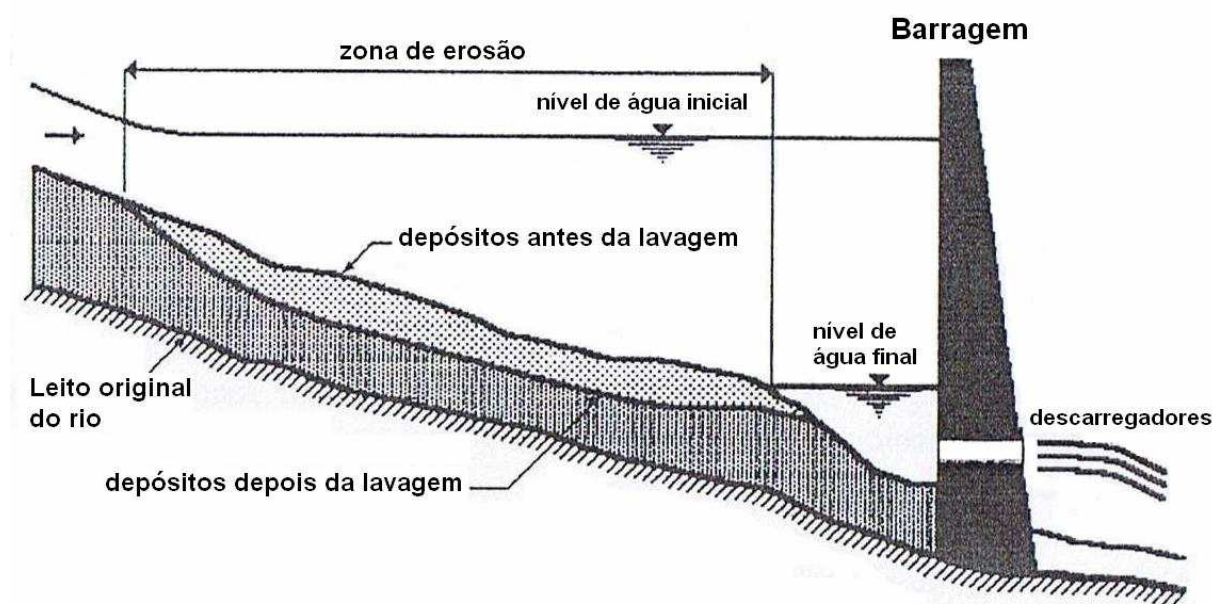
Quadro 4.1 – Principais técnicas de remoção dos diferentes tipos de sedimentos (adaptado de Sánchez, 2008).

Cascalho e Areia		Silte e Argila	
Remoção mecânica (albufeira vazia)	Dragagem (albufeira cheia)	Lavagem	Dragagem

Por vezes estas técnicas são aplicadas em conjunto de forma a melhorar reciprocamente a sua eficiência.

A lavagem (“flushing”) é uma técnica operacional em que as velocidades do escoamento na albufeira são aumentadas até que os sedimentos depositados são novamente mobilizados sendo transportados através dos descarregadores. Em muitos casos a passagem dos sedimentos e a lavagem são utilizadas em combinação ou alternadamente, Basson e Rooseboom (1999).

Geralmente, no final da época de secas e antes do início da época de cheias, as albufeiras ainda armazenam um volume de água considerável que pode ser utilizado para remover hidraulicamente os sedimentos previamente depositados, através da sua descarga, figura 4.8.

Fig.4.8 – Lavagem de sedimentos, (adaptado Batauca *et al.*, 2000).

Durante o processo de descarga da albufeira os depósitos sedimentares do canal do rio sofrem erosão. A largura e inclinação do canal aproximar-se-ão das que existiam anteriormente à deposição dos sedimentos caso se trate de operações de descarga repentinas e periódicas. O processo de erosão durante a descarga das albufeiras é descrito por Zhang e Qian (1985): quando o nível de água na albufeira diminui abaixo do vértice do delta ocorrerá erosão regressiva até que as inclinações a montante e a jusante desse ponto sejam iguais, e depois terá lugar a erosão progressiva que vai reduzindo a sua intensidade com a redução da inclinação do delta, Basson e Rooseboom (1999). A erosão regressiva é geralmente mais dominante do que a erosão progressiva e portanto é mais importante na remoção dos sedimentos depositados, Basson e Rooseboom (1999).

A descarga de uma albufeira pode ocorrer sob pressão ou com superfície livre. A descarga sob pressão ocorre quando os níveis de água se mantêm acima do nível mínimo de exploração e a descarga é feita através de um orifício sem interrupção da função de armazenamento que é praticada quando se pretende a erosão localizada dos sedimentos nas tomadas de água. A descarga com superfície livre ocorre quando as comportas dos descarregadores estão completamente abertas e o nível de água na albufeira é significativamente reduzido, mas não inferior à elevação do descarregador mais baixo, com esta operação o escoamento sobre os depósitos aproxima-se do escoamento original do rio. As descargas com superfície livre são mais eficientes do que as descargas sob pressão, cerca de 10 vezes superior, como é ilustrado através das duas relações empíricas estabelecidas por Wu (1989) para algumas albufeiras em Taiwan.

Para descarga com superfície livre:

$$C_w = 847.1 \left(\frac{V^3}{ghw} \right)^{-0.49} \quad (4.1)$$

Para descarga sob pressão:

$$C_w = 64.9 \left(\frac{V^3}{ghw} \right)^{-0.45} \quad (4.2)$$

em que C_w (kg/m^3) representa a concentração de sedimentos, V (m/s) a velocidade do escoamento no descarregador, h (m) a profundidade do escoamento na albufeira, w (m/s) a velocidade de deposição das partículas de sedimentos e g (m/s^2) a aceleração da gravidade. Nestas duas equações, o expoente do termo V^3/gdw é aproximadamente o mesmo, no entanto o coeficiente de multiplicação é mais de 10 vezes superior para o escoamento com superfície livre do que para o escoamento sob pressão. A lavagem deve ser o mais demorada possível com superfície livre e muito curta quando sob pressão (Batuca *et al.*, 2000).

A principal diferença de requisitos no caso da passagem dos sedimentos e no caso da lavagem é que neste último caso o sucesso da operação é principalmente condicionado pela localização dos descarregadores de fundo, que devem estar perto do nível do leito original, enquanto no primeiro caso o sucesso da operação requer excesso de precipitação. Em regiões áridas e semi-áridas as operações de lavagem resultam frequentemente em grandes e inaceitáveis perdas de água. Portanto, quer a passagem de sedimentos, quer a lavagem aumentam o risco de falha no abastecimento de água durante os períodos hidrológicos críticos (Brabben, 1988; White e Bettes, 1984, Basson e Rooseboom, 1999). Não é possível descarregar as albufeiras de armazenamento inter-anual ou quando não podem ser toleradas interrupções periódicas na utilização (White e Bettes, 1984, Basson e Rooseboom, 1999). Em tais casos os riscos podem ser reduzidos operando as albufeiras em combinação umas com as outras (Basson e Rooseboom, 1999).

As condições favoráveis a uma lavagem eficiente são (Bruk, 1985; Paul e Dhillon, 1988, Delft Hydraulics, 1992, Basson e Rooseboom, 1999):

- Baixa carga hidráulica nos descarregadores, preferivelmente condições de escoamento com superfície livre;
- Elevadas descargas;
- Depósitos não coesivos e não consolidados, sem cascalho;
- Descarregadores de fundo largos (é recomendada a forma rectangular) e em número adequado;
- Localização profunda dos descarregadores, preferivelmente ao nível do leito original;

- Protecção dos descarregadores contra a acção abrasiva dos sedimentos;
- Pequena capacidade da albufeira: reduzido rácio capacidade/afluência correspondente a um excesso de água para descarga;
- Elevada inclinação do leito;
- Albufeira estreita e longa (tipo 4 – vale encaixado, fig.4.5);
- Clima húmido ou semi-húmido e temperado com época de cheias e secas distintas;
- Abastecimento de água preferivelmente a aproveitamentos hidroeléctricos. A geração de electricidade decrescerá consideravelmente devido à redução do nível de água, e tais condições, a menos que tenham sido previstas na concepção de um aproveitamento hidroeléctrico, podem não satisfazer os requisitos para o funcionamento do aproveitamento;
- Combinação com outras medidas como a dragagem.

Para além da perda de água, a descarga da albufeira pode ter outros efeitos negativos (Qian, 1982; Yoon, 1991; Mahmood, 1987, Basson e Rooseboom, 1999):

- A elevada perda de água durante a descarga, que pode ser inaceitável em regiões áridas ou semi-áridas;
- O risco de falta de abastecimento de água durante períodos hidrológicos críticos;
- A repentina descida do nível de água numa albufeira pode criar cheias artificiais nos troços do rio a jusante da barragem;
- A repentina redução do nível de água poderá levar ao deslize de terras que podem reduzir a capacidade de armazenamento e por em perigo a segurança, especialmente das barragens de terra;
- Os sedimentos ao serem descarregados podem provocar a abrasão dos descarregadores.

A lavagem da albufeira permite que o escoamento natural remova os sedimentos que estão depositados mas arrasta-os para uma secção do rio a jusante da barragem. Caso fosse possível recorrer a esta técnica ou à passagem dos sedimentos em todas as barragens no curso de um rio, uma boa parte dos sedimentos acabaria por atingir a zona costeira de forma relativamente natural. No entanto, devido aos aspectos negativos já referidos inerentes a estas técnicas a sua aplicação nem sempre é viável e portanto estas deverão ser complementadas com outras técnicas, como por exemplo a dragagem.

Qualquer operação de dragagem consiste em três componentes principais: escavação, transporte e depósito dos sedimentos. A remoção mecânica consiste na dragagem através de processos mecânicos, quando a albufeira está total ou parcialmente vazia e assemelha-se a qualquer outro trabalho de movimentação de terras com recurso a escavadoras e a camiões para transportar os sedimentos removidos.



Fig.4.8 – Remoção mecânica (<http://www.urmi.pt/tramagal.htm>).

A selecção do equipamento de dragagem mais adequado é feita em função das especificidades de cada projecto. Existem equipamentos de dragagem convencional mecânicos e hidráulicos. O “bucket-wheel” é o principal equipamento mecânico de dragagem para trabalho subaquático, este equipamento é adequado para remoção do material mais grosseiro, mas requer locais de depósito próximos do local do trabalho, figura 4.9, Batuca e Jordaan (2000).



Fig.4.9 – Bucket-wheel (<http://www.gendredge.com/nigeria/bucket.php>).

Um exemplo de uma técnica especializada com aplicação de equipamento hidráulico é a dragagem com sifão. Esta técnica aspira hidraulicamente os sedimentos depositados aproveitando a diferença de carga hidráulica a montante e a jusante da barragem como força motriz. Quando a conduta de aspiração passa por cima da barragem até à bacia de descarga (fig.4.10a) a operação pode ficar condicionada pela pressão barométrica, não podendo o nível de água na albufeira descer abaixo do ponto mais elevado da conduta mais do que 9 ou 10 metros e necessitando de uma bomba de aspiração para iniciar o escoamento sob pressão na conduta. Outra possibilidade é a passagem da conduta através dos descarregadores de fundo da barragem (fig.4.10b), passando a operação a estar condicionada pela diferença total de carga hidráulica e não sendo necessário recorrer à bomba de aspiração para iniciar o processo, Batuca e Jordaan (2000).

A conduta, geralmente com diâmetro entre 300 e 700 mm, é relativamente curta (algumas centenas de metros), sendo o seu comprimento limitado pela diferença de carga hidráulica disponível e pelas perdas hidráulicas do escoamento sob pressão da mistura de água e sedimentos. Dependendo das especificidades de cada projecto a conduta pode ser totalmente metálica (num projecto fixo e permanente) ou totalmente flexível (de plástico ou borracha), geralmente adopta-se um determinado número de curtos segmentos metálicos (2 a 4 m) ligados através de partes flexíveis de borracha.

A cabeça de sucção é um elemento muito importante do sistema de dragagem com sifão pois a sua forma, tamanho e modo de condução determinam o sucesso e eficácia da operação. A sua forma pode ser circular, cónica, parcialmente cónica e com ou sem grelha na frente. A fim de aumentar a eficácia da remoção dos sedimentos e quando as condições locais dos depósitos de sedimentos o permitem, as cabeças de sucção podem ser equipadas com elementos de corte. O seu diâmetro é geralmente da mesma ordem de grandeza do diâmetro da conduta. Uma cabeça de sucção particular com a forma de

“saxofone” foi desenvolvida por Jacobsen (1993), Batuca e Jordaan (2000). Esta cabeça extrai água limpa através de uma abertura superior, que estará sempre acima dos sedimentos depositados, de forma a evitar o entupimento da conduta, a mistura de sedimentos e água entra por umas ranhuras na parte inferior da unidade, figura 4.11. Aparentemente este tipo de cabeça de sucção é seguro e fácil de operar e o sistema não entope, Batuca e Jordaan (2000).

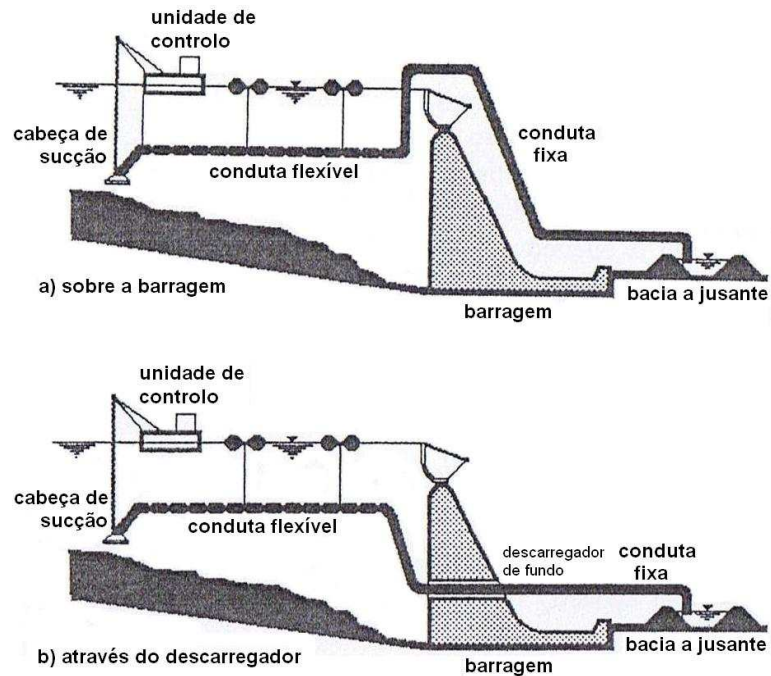


Fig.4.10 – Dragagem com sifão (adaptado de Batuca e Jordaan (2000)).

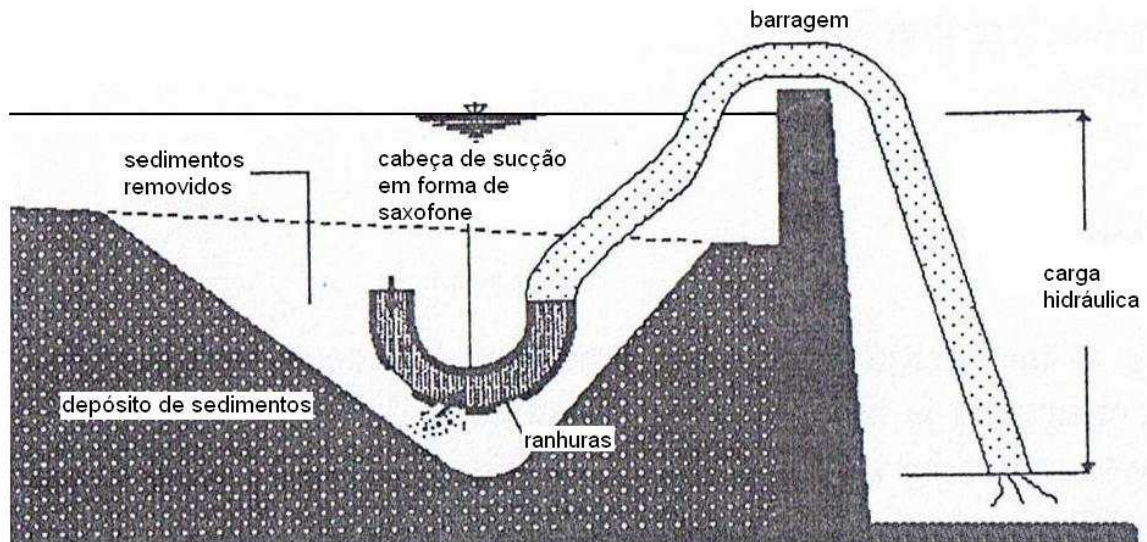


Fig.4.11 – Cabeça de sucção em forma de saxofone (adaptado de Batuca e Jordaan (2000)).

Um sistema especial e interessante de dragagem com sifão foi desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia Norueguês, por Jacobsen (1993). Como foi descrito por Lysne *et al.* (1995), o chamado

“Slotted Pipe Sediment Sluicer” (SPSS) consiste numa conduta com uma linha de ranhuras no fundo que se fixa próximo do leito na albufeira e que está ligada a outra conduta que atravessa a barragem (eventualmente através dos seus descarregadores de fundo) e descarrega a jusante, a extremidade de montante da conduta estará sempre acima dos sedimentos depositados como mostra a figura 4.12 (Batuca *et al.*, 2000).

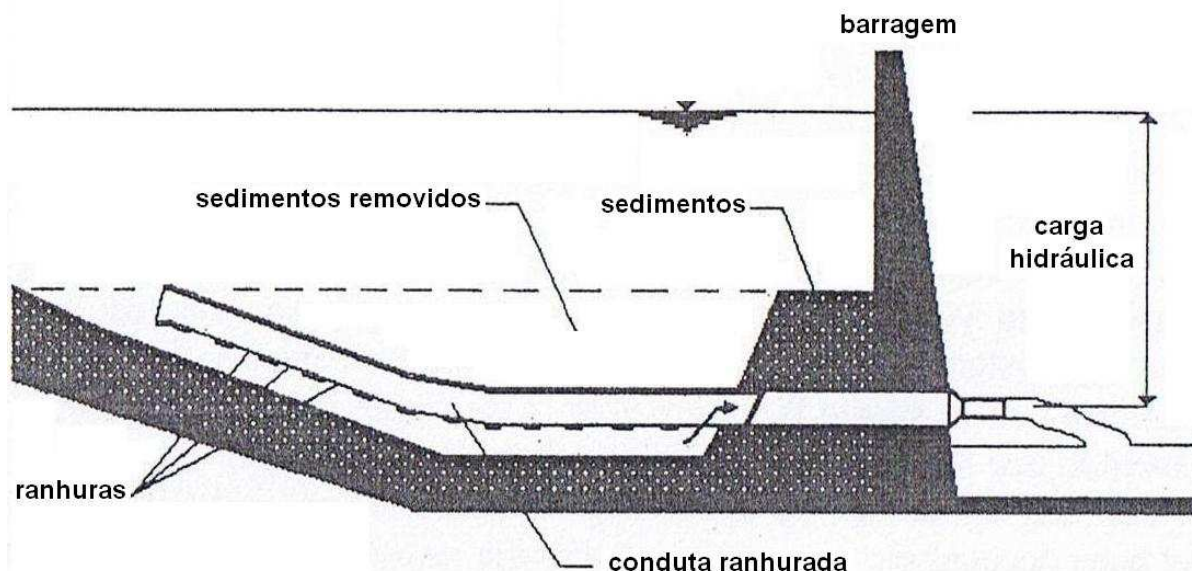


Fig.4.12 – “Slotted pipe sediment sluicer” (adaptado de Batuca *et al.*, 2000).

Este sistema é operado da seguinte forma:

- Primeiro, os sedimentos depositam-se sobre a conduta ranhurada até se obter uma espessura suficiente para ser removida;
- Abre-se a válvula na conduta, a água é extraída através das ranhuras e a sucção dos sedimentos move-se para jusante ao longo da conduta até todos os sedimentos que cobriam a conduta serem removidos;

As dificuldades de aplicação deste sistema prendem-se com a colocação da conduta ranhurada no fundo da albufeira e com a determinação do momento certo para iniciar a sucção (momento em que a conduta ranhurada está suficientemente coberta de sedimentos mas não demasiadamente);

As principais vantagens da dragagem com sifão são Batuca e Jordaan (2000)

- Minimização da poluição na área de trabalho;
- Viabilidade e economia de custos;
- O consumo de água é mantido o mais baixo possível;
- Funcionamento simples e facilmente ajustável às variadas condições locais;
- Elevada capacidade de remoção a grandes profundidades;
- O equipamento pode ser facilmente movido no local de trabalho de forma a cobrir toda a área da albufeira e pode ser desmontado e transportado para outro local.

A utilização da dragagem na extracção dos sedimentos implica a criação de uma área de armazenagem que permita a secagem do material antes do seu transporte. Este sistema é geralmente utilizado quando não é aconselhado o esvaziamento da albufeira porque a água armazenada é essencial para a vida comunitária, abastecimento de água ou irrigação em regiões áridas. A única grande desvantagem deste

sistema é a possibilidade de entupimento da conduta por sedimentos de grandes dimensões que se podem revelar difíceis de remover, Bатуca e Jordaan (2000).

A reutilização dos sedimentos dragados contribui para a redução dos custos de dragagem. Na maioria dos casos, contudo, os elevados custos de transporte são o factor condicionante.

Embora não oferecendo uma solução a longo termo para o problema da sedimentação, uma albufeira é sempre projectada com uma capacidade suficiente para acomodar os sedimentos, quando a sua capacidade se torna demasiado pequena para satisfazer a procura de água, a barragem é reforçada ou novas barragens são construídas. Com descarregadores localizados a níveis baixos e com estratégias de controlo de sedimentos adequadas, o sobredimensionamento de uma barragem pode ser limitado e pode ser assegurada uma capacidade útil a longo termo, Basson e Rooseboom (1999).

4.2. METODOLOGIAS DE TRATAMENTO DOS SEDIMENTOS

Quando os sedimentos são removidos através de dragagens ou escavações, podem ser desviados do curso natural do rio para bacias localizadas, preferencialmente, próximas do local de extracção, permitindo que se proceda ao tratamento dos sedimentos mais adequado para os diversos tipos de reaproveitamento possíveis.

O planeamento do tratamento dos sedimentos deverá ser efectuado antes mesmo da sua extracção, uma vez que, podendo representar custos muito variáveis, o tratamento poderá inviabilizar todo o projecto de reaproveitamento. Assim sendo, é conveniente analisar previamente os sedimentos a fim de conhecer a suas propriedades físicas (percentagem de areia, d_{50}), composição mineralógica e química.

Os sedimentos do fundo das albufeiras são reconhecidos como locais preferenciais de deposição de materiais orgânicos e minerais, em particular, nutrientes, metais pesados e bactérias, considerados no seu conjunto como fontes poluentes. Devido à circulação contínua de elementos químicos através da interface sedimento-água, estes materiais são libertados para a coluna de água, sendo esta a principal razão para a degradação da sua qualidade, Fonseca (2002).

A análise química permite avaliar as concentrações de metais (Zn, Pb, Ni, Cr, Cd, Cu e Hg), a contaminação e o conteúdo em matéria orgânica. Desta forma, enquanto que a análise física e mineralógica permite um melhor conhecimento da composição e propriedades dos sedimentos disponíveis, a análise química permite tomar uma decisão quanto à eventual necessidade de descontaminação dos sedimentos e até da água da albufeira. Com vista à alimentação artificial de praias será mais importante avaliar as concentrações de metais presentes nos sedimentos do que o conteúdo em matéria orgânica uma vez que esta última até pode ser favorável, no caso de ser aplicada em cordões de dunas, criando condições para o desenvolvimento de vegetação.

O processo de tratamento dos sedimentos removidos das albufeiras a fim de os preparar para os seus diversos fins pode dividir-se em duas fases distintas:

- Distribuição granulométrica;
- Descontaminação.

A distribuição granulométrica é geralmente obtida por peneiração. Conforme as dimensões requeridas faz-se a selecção dos sedimentos de acordo com os fins a que serão destinados. Na maioria dos casos seria necessário uma área de tratamento onde o material mais grosseiro fosse separado do silte e argila.

Para a alimentação de praias a fracção requerida corresponde à fracção de areia (dimensões entre 0,075mm, #200 e 4,75mm, #4), a granulometria deverá ser o mais próxima possível da granulometria da praia a alimentar. Nem sempre tal é possível, já que as fontes de sedimentos não abundam (em quantidade e qualidade) e há outros factores ambientais e económicos a ponderar.

Os sedimentos de granulometria diferente desta servirão evidentemente para outros fins, os sedimentos mais grosseiros poderiam ser aproveitados para aplicação na construção civil e a fracção mais fina poderia ser utilizada como aditivos para tratamento dos solos em regiões onde a erosão é muito acelerada.

As praias alimentadas com granulometrias mais elevadas serão mais estáveis mas mais declivosas, induzindo novos perfis com possíveis implicações a nível de comodidade e segurança balnear. Praias alimentadas com granulometrias menores são potencialmente mais instáveis e por conseguinte os volumes colocados tenderão a ser levados mais rapidamente pelas acções do mar. Os custos de dragagem/bombagem variam com a granulometria bem como com a eventual presença de detritos fragmentados. Se os sedimentos forem finos (diâmetros d_{50} inferiores a 0.2mm, como ordem de grandeza), o que muito provavelmente significará que terão também algum teor de matéria orgânica inerte, poderão ser colocados em zonas vulneráveis no reforço de cordões dunares, Veloso Gomes (2009).

Tem sido genericamente aceite que as partículas poluídas se concentram na fracção mais fina dos sedimentos, Colandini (1997), Lee *et al.* (1997), Zanders (2005), por Pétavy *et al.* (2008). Contudo, estudos recentes, referem que os metais não especificam uma fracção de sedimentos para se fixarem, Durand (2003), Clozel *et al.* (2006), por Pétavy *et al.* (2008).

Sendo que a fracção mais fina é a mais susceptível de contaminação, a necessidade de proceder a uma descontaminação não deverá ser descartada à partida, mesmo relativamente às fracções mais grosseiras. Será, portanto conveniente confirmar sempre a necessidade de descontaminação através de análises químicas antes de se proceder ao transporte dos sedimentos para aplicação nas praias. A descontaminação poderá processar-se através de tratamento químico ou físico (abrasão) dos sedimentos.

O tratamento químico dos sedimentos deverá definir-se através da realização de análises químicas quer da areia natural da praia (à qual se pretende obter uma aproximação), quer da areia extraída das albufeiras, assegurando o tratamento mais adequado para cada caso. A figura 4.13 é um exemplo da complexidade envolvida no processo de tratamento, ao qual, sobretudo as partículas mais finas deverão ser sujeitas.

Contudo, no tratamento da fracção de areia há uma alternativa ao tratamento químico. O processo de tratamento físico consiste na remoção da camada superficial das partículas de sedimentos correspondente ao aglomerado de contaminantes, através da abrasão, sendo o aglomerado contaminante superficial desgastado e a separação dos produtos (contaminantes e partículas sãs) é obtida por simples peneiração, figura 4.14.

Na figura 4.14 a letra *A* indica a partícula inicial, *B* o processo de abrasão, *C* o processo de quebra, *D* a situação depois da abrasão em que a partícula está sã (parte azul na figura), separada do aglomerado (parte cinzenta) e *E* a situação depois da quebra em que o aglomerado permanece ligado à partícula, não ocorre separação (Pétavy *et al.* 2008).

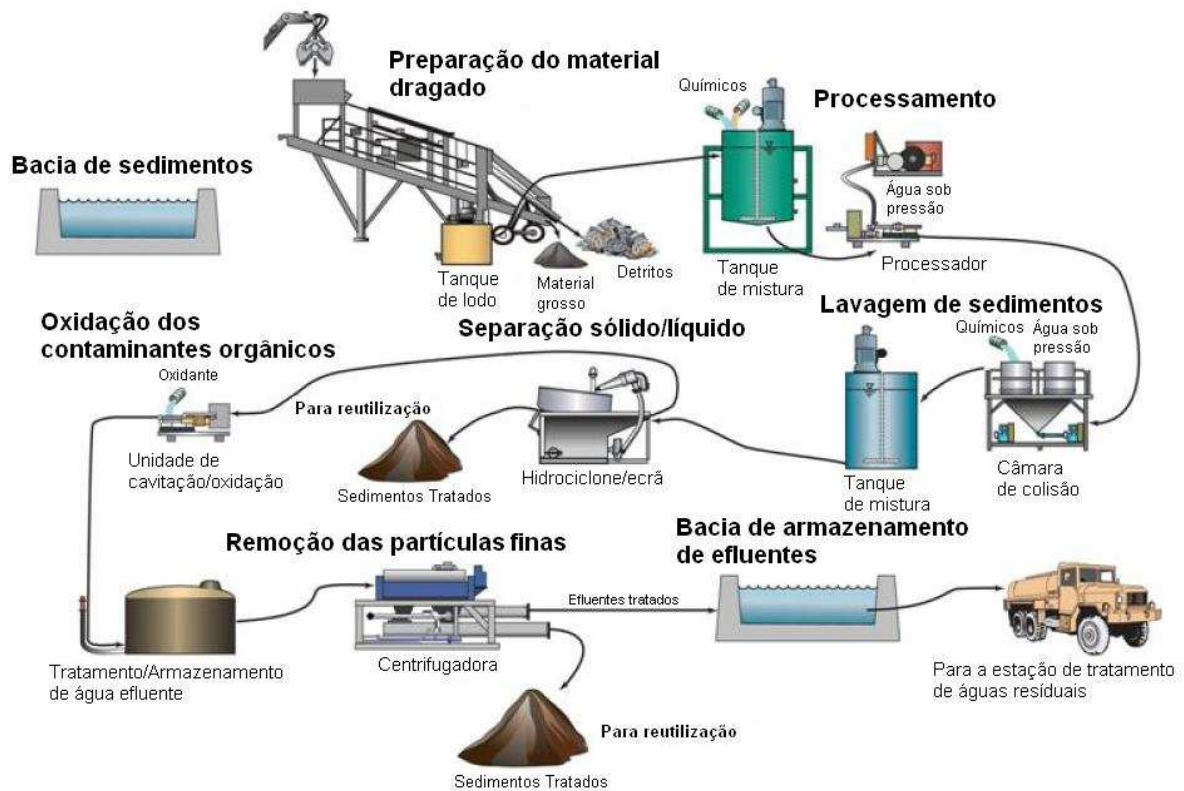


Fig.4.13 – Esquema do processo de tratamento químico dos sedimentos (adaptado de Autoridade Portuária de Veneza (2004)).

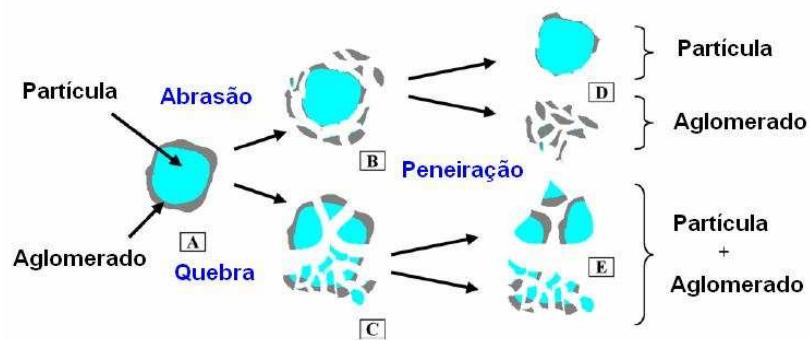


Fig.4.14 – Esquema comparativo dos processos de abrasão e quebra (adaptado de Pétavy *et al.* 2008).

Os sedimentos são uma valiosa fonte de informação ecológica sobre um sistema aquático, permitindo a detecção de substâncias poluidoras e uma maior exactidão na análise de poluentes metálicos, cujos teores nos sedimentos são muito superiores aos da água. Permitem ainda uma caracterização cronológica da poluição hídrica pela análise comparativa da concentração de poluentes nas diferentes camadas dos sedimentos recolhidos em tubo, Gonçalves (1987), PNA.

“Em relação à avaliação da qualidade dos sedimentos nas fontes, em Portugal, a portaria n.º1450/2007, de 12 de Novembro, fixa as regras para a aplicação do Decreto-Lei n.º226-A/2007, de 31 de Maio, que estabelece o regime da utilização dos recursos hídricos, na sequência da aprovação da lei n.º58/2005,

de 29 de Dezembro (lei da água), que transpôs para o ordenamento jurídico nacional a directiva n.º2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro (Directiva Quadro da Água). Essa Portaria possibilita a classificação de materiais dragados de acordo com o grau de contaminação (Classes 1 a 5). Os materiais da classe 1 (material dragado limpo) e os da classe 2 (material dragado com contaminação vestigiária) são os que poderão ser utilizados em operações de alimentação artificial”, Veloso Gomes (2009).

O quadro 4.2 mostra os valores das cargas poluentes para alguns rios de Portugal, apresentados no Plano Nacional da Água.

Quadro 4.2 – Cargas poluentes em toneladas por ano (retirado do PNA).

Parâmetro/Sistema	Minho	Douro	Ria de Aveiro	Tejo	Sado	Ria Formosa	Guadiana
SST	60000		7284	100000			
CBO	20000		6335	100000			20000
N	10700	40000	1400-3200	30000	2000	1060	10000
P	1830	8800	330-780	8000	330-400	140	2000
Metais	21 Cu		1-3/metal	1-1000/metal			

Sumariamente, a necessidade de descontaminação de areias representa um grande custo num projecto de reaproveitamento de sedimentos para alimentação artificial de praias podendo até inviabilizar todo o projecto e portanto deverá ser bem avaliado. Contudo, geralmente, este processo de descontaminação pode ser dispensado relativamente à fracção mais grossa, sendo, nesse caso, o processo de tratamento dos sedimentos removidos das albufeiras ilustrado pela figura 4.15.

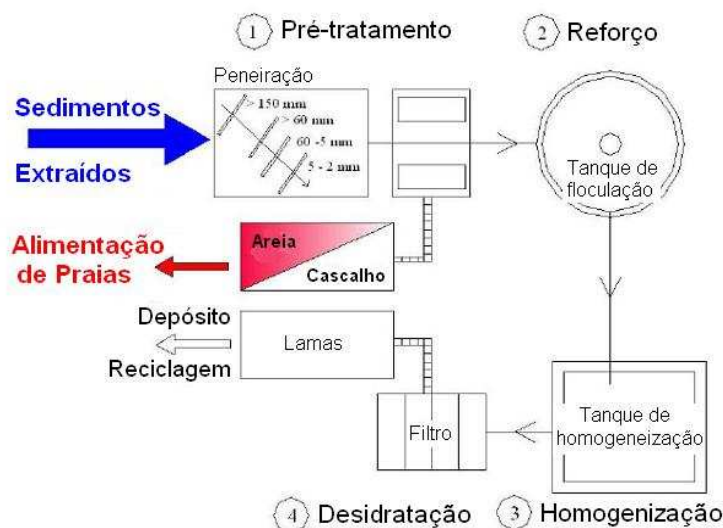


Fig.4.15 – Esquema do processo geral de tratamento dos sedimentos removidos das albufeiras com vista ao seu reaproveitamento (adaptado de V. Sánchez, 2008).

4.3. ANÁLISE DO CASO PORTUGUÊS

4.3.1. INTRODUÇÃO

Em Maio de 2004 foram tornados públicos os resultados de um estudo de dois anos designado por EUrosion financiado pelo Parlamento Europeu e pela Comissão Europeia, com o objectivo de

evidenciar quantitativamente que a erosão costeira é um problema crescente, para o qual as autoridades públicas nem sempre conseguem dar resposta adequada, sendo por isso necessário avaliar as acções prioritárias.

De alguma forma, todos os estados costeiros Europeus se encontram afectados pela erosão costeira. Em 2004 cerca de 20 mil km de costa, que correspondem a cerca de 20% do comprimento total, enfrentavam impactes significativos. A maior parte das áreas afectadas (15 100 km) estavam a recuar activamente apesar da existência de obras de defesa (2 900 km). Adicionalmente, 4 700 km foram artificialmente estabilizados. Estima-se que, na Europa, 15 km² de terra são anualmente perdidos ou severamente afectados pelo fenómeno da erosão, European Commission (2004), por Veloso Gomes *et al.* (2006a).

Em 2001 as populações costeiras atingiram cerca de 70 milhões de habitantes. Em 2000 o investimento nas zonas costeiras foi estimado entre 500 a 1 000 biliões de euros. O fenómeno natural de erosão foi transformado num problema de intensidade crescente pela intervenção humana sobre as zonas costeiras, na medida em que as zonas de baixa altitude, que eram naturalmente capazes de se adaptar às variações no nível médio da água do mar, às tempestades e marés, hoje em dia perderam essa capacidade devido à fixação da linha de costa por estradas, urbanizações, parques de recreio, zonas industriais, entre outras infraestruturas e ocupações. Nos últimos anos, algumas centenas de casas tiveram que ser abandonadas devido ao risco iminente de erosão e muitas mais sofreram uma desvalorização significativa, para além de perdas mais significativas na sequência de inundações associadas ao desaparecimento ou ao colapso de dunas e de obras longitudinais aderentes com impacte em vários quilómetros quadrados e afectando milhares de pessoas.

“A erosão costeira não é um fenómeno recente. É um processo natural que sempre existiu e ajudou a modelar a costa ao longo da História, embora a evidência demonstre, que a actual escala está longe de ser natural. Em muitos locais, as tentativas levadas a cabo para remediar a situação vieram a agravá-la ainda mais, ao acelerar as erosões em áreas próximas.”, Veloso Gomes *et al.* (2006a).

A alimentação artificial de praias e dunas, tem gerado nos últimos anos um enorme entusiasmo, devido à sua capacidade de contribuir para a segurança, através da reposição de sedimentos pelo homem em substituição do que anteriormente ocorreria por obra da Natureza. Estas técnicas são geralmente eficazes se permitirem uma relação custo-benefício elevada, requisito este que muito frequentemente não se verifica. Estas operações são muitas vezes realizadas com base num conhecimento incompleto da hidrodinâmica costeira.

Neste contexto, é cada vez mais difícil reconciliar a segurança de pessoas e bens com os processos costeiros. Com efeito, o actual desenvolvimento urbano em frentes marítimas, a diminuição do volume de sedimentos que alimentam naturalmente as praias e as previsões para as alterações climáticas levam a concluir, por um lado, que os custos (directos e indirectos) das medidas de mitigação irão aumentar e, por outro, que a sua eficácia a longo-termo irá diminuir. Neste sentido, a salvaguarda da dinâmica natural da linha de costa parece ser o factor chave para gerir a erosão. No entanto, em muitos casos, houve já perda irreversível de habitats costeiros e, em consequência, uma redução das suas características de dinâmica natural e a perda das suas funções sociais, económicas e ecológicas, Veloso Gomes *et al.* (2006a).

“As zonas costeiras portuguesas, são territórios de interacção geográfica, física, ecológica, humana e económica entre o Mar e a Terra. Não são susceptíveis de uma delimitação geográfica rígida já que, consoante a natureza dessas interacções, podem abranger maiores ou menores extensões terrestres ou aquáticas. As populações aspiram e têm direito ao usufruto das condições climáticas e paisagísticas das Zonas Costeiras. Sob a acção da agitação e das marés, as praias estão submetidas a movimentos

aluvionares transversais sazonais, oscilando o seu perfil em torno de posições médias. Durante as tempestades mais violentas ou persistentes e/ou quando as praias estão emagrecidas, a agitação “retira” areia, das zonas imersas e emersas da praia e das dunas. Mas em períodos calmos, a agitação pode lentamente repor as bermas se existir areia suficiente nas faixas imersas da praia, porque a capacidade de transporte do espraçamento (em direcção à praia) passa a ser superior à do refluxo (em direcção ao mar). Por sua vez, as areias superficiais, conduzidas pelo vento, podem restaurar lentamente as dunas que serviriam de “volante de reserva” durante a tempestade. A obliquidade da agitação em relação à praia gera a movimentação de grandes volumes de areia para sotamar de que resultará um emagrecimento da praia, temporário ou permanente, se não ocorrer uma alimentação compensatória proveniente de barlamar. Como se verifica um défice generalizado do transporte sedimentar ocorre uma situação quase generalizada de fenómenos de erosão. O aproveitamento energético dos rios, em Portugal e Espanha, através da construção de barragens constitui actualmente uma componente indispensável do fornecimento de energia renovável à sociedade. Mas os aproveitamentos hidráulicos para produção de energia, abastecimento de água a populações e indústria e para usos agrícolas estão a reduzir drasticamente o caudal sólido transportado para o mar, agravando as erosões na costa.”, Veloso Gomes e Taveira Pinto (1997).

A principal direcção do transporte de sedimentos na costa atlântica portuguesa é norte-sul. As taxas de transporte de sedimentos pelo mar não estão disponíveis ou não existem. De forma a dar uma ideia da capacidade de transporte do mar, algumas referências indicam que é próxima de 1000000 m³/ano desde a foz do Douro até à Nazaré, Veloso Gomes *et al.* (2006b).

A extracção ilegal de areias também ocorre em diversos sistemas de dunas e praias, Veloso Gomes *et al.* (2006). Com poucas excepções, a grande maioria do volume de areias extraído tem sido utilizado para a construção civil ou para aterros portuários, pelo que essas areias deixaram de circular ao longo da costa, Veloso Gomes (2009).

Assiste-se assim, hoje, ao recuar generalizado da linha de costa, ao agravamento dos fenómenos de erosão e à sua expansão de Norte para Sul. Esta dinâmica não é nova, de facto a linha de costa esteve, desde sempre, em constante modificação, contudo, se no passado estas dinâmicas não impunham intervenções de controlo até porque não se conheciam meios técnicos para o fazer, actualmente a situação é outra, devido ao tipo de ocupação do solo e aos usos que se verificam nas zonas costeiras, Veloso Gomes (2009).

Em função disso algumas das previsões de evolução da linha de costa que constam do Plano de Ordenamento da Orla Costeira Ovar – Marinha Grande, com menos de um decénio, já foram ultrapassadas, Veloso Gomes (2009).

Em 1996 investiu-se na defesa da costa Portuguesa cerca de 4 387 200 €, em 1997 o investimento aumentou para 14 662 210 €, em 1998 caiu para 5 742 660 € e em 1999 o investimento foi de 6 798 320 €, Veloso Gomes *et al.* (2006b). A figura 4.16 ilustra o investimento realizado em 2008 no ordenamento da orla costeira sendo que 7 579 000 € correspondem a obras de defesa costeira, Maia (2009).

Um projecto de reaproveitamento dos sedimentos depositados nas albufeiras para alimentação artificial de praias pode representar custos elevados, contudo na avaliação da viabilidade destes projectos será necessário ter presente a dimensão dos investimentos necessários quer na implementação de soluções alternativas quer na sua manutenção uma vez que a reparação e adaptação de obras de defesa têm representado uma grande parte desses investimentos.

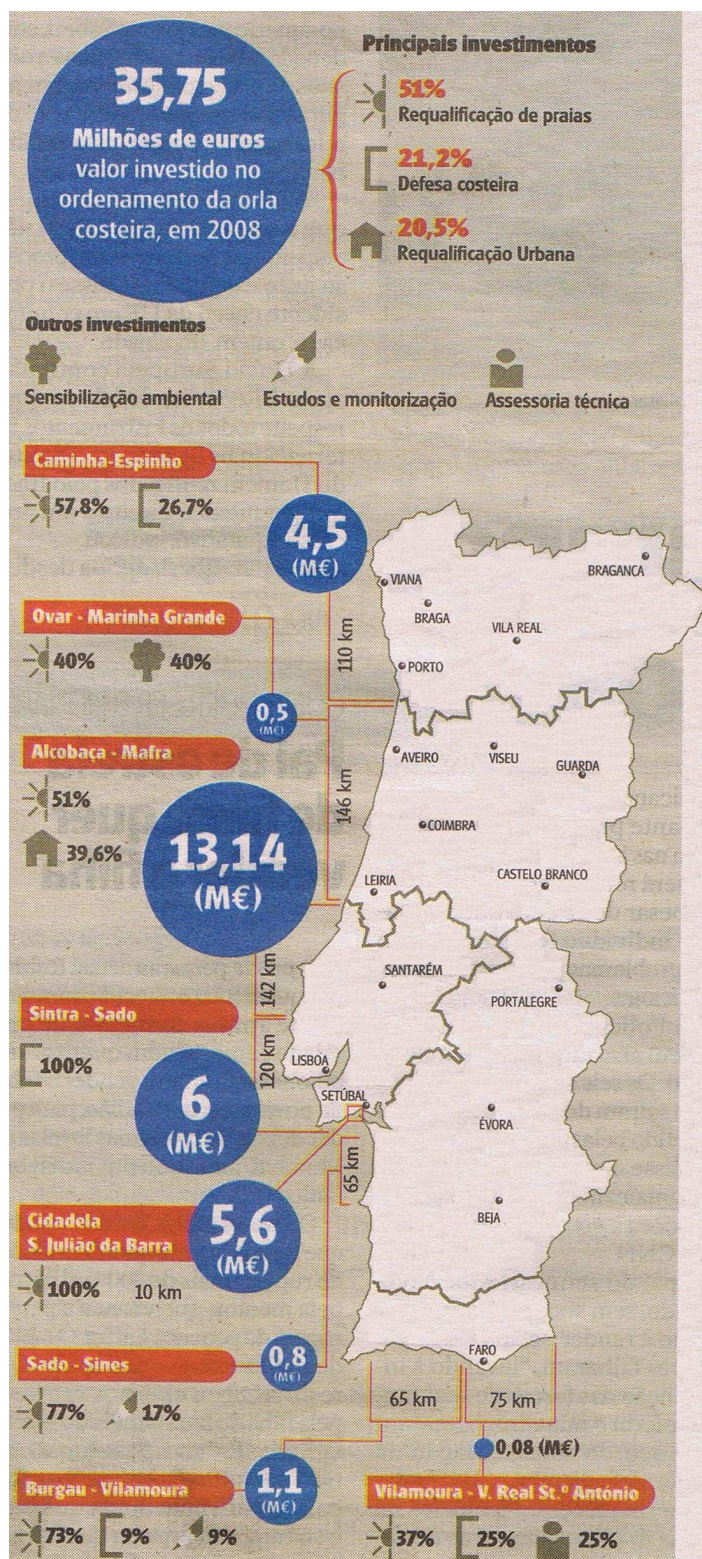


Fig.4.16 – Fonte: Ministério do ambiente, retirado do Jornal de Notícias de 21 de Abril de 2009 (retirado de Maia (2009)).

O prolongamento dos esporões, por exemplo, poderá contribuir para que as areias repostas nas praias aí permaneçam por períodos mais dilatados, no entanto, dado o elevado défice sedimentar que desde

há muitos anos existe a sul das barras do Lima, Cavado, Ave, Douro, Aveiro, Mondego, os problemas erosivos a Sul dos esporões agravar-se-iam ainda mais com a interrupção do pequeno transporte sedimentar que ainda subsiste. Os fenómenos de erosão que se fazem sentir na costa portuguesa de forma cada vez mais grave e intensa exigem a alimentação de praias e dunas com uma boa parte das areias dragadas e a eventual adopção de soluções de by-pass aos quebramares e embocaduras, Veloso Gomes (2009).

Sendo a construção das barragens apontada como a principal causa para a redução do transporte sedimentar nos rios, foi estimado que essa redução em Portugal ascende a cerca de 80%, Fonseca (2002). O excesso de deposição de sedimentos nas albufeiras tem vários efeitos negativos:

- Diminuição do período de vida útil do empreendimento devido à diminuição do volume de armazenamento de água com consequente diminuição do potencial de geração de electricidade e de abastecimento de água potável;
- Danos causados na estrutura ou órgãos da barragem;
- Deterioração da qualidade da água devido à acumulação de nutrientes e metais pesados nos sedimentos.

A análise do assoreamento deve fazer parte das actividades de projecto, sendo indispensável a uma correcta colocação dos órgãos de tomada de água, para prevenir eventuais dificuldades de operação, ou mesmo de interrupções no aprovisionamento da água. Paralelamente, a análise da operação a longo prazo do aproveitamento hidráulico deve atender à evolução temporal dos eventuais assoreamentos, e das suas implicações no volume de água armazenada.

Os melhores locais para a implantação de barragens são um recurso natural valioso, e o seu número é limitado. À medida que os locais forem sendo utilizados, a escolha de novos locais tornar-se-á cada vez mais difícil e, consequentemente, a perda de capacidade de uma albufeira, restringindo a sua utilização como reserva de água, é uma perda que se pode tornar irreversível se nada se fizer no sentido de manter a capacidade de armazenamento das albufeiras já existentes, Rocha (1998).

4.3.2. ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA EM PORTUGAL

Desde cedo se sentiu a necessidade de construir barragens com o propósito de reservar a água precipitada na estação húmida, que em Portugal pode representar aproximadamente $\frac{3}{4}$ do ano, para a utilização na estação seca. A construção de barragens cada vez maiores, possibilitou a reserva não só da estação húmida para a estação seca, mas também dos anos húmidos para os anos secos. Existem actualmente albufeiras com grande índice de regularização, como é o caso das albufeiras do Alto Rabagão e do Alvito com índices de regularização superiores a 3. Por exemplo, o aproveitamento do Alqueva apresenta um índice de regularização de apenas 1,10 (anexo A). As barragens têm um grande impacto no transporte de sedimentos nos rios, podendo, na prática, considerar-se que barragens com índices de regularização superiores a 0,6 retêm todos os sedimentos afluentes, Brune (1953), por Rocha (1998). À medida que o tempo passa a capacidade da albufeira diminui e consequentemente a sua eficiência de retenção também diminui. Assim se compreende que seja necessário decorrer muito tempo para que uma albufeira fique completamente assoreada, contudo, na prática, a vida útil de uma albufeira termina quando o volume assoreado for suficiente para inviabilizar o aproveitamento de acordo com os objectivos traçados inicialmente, Lencastre e Franco (2006). Na tabela do anexo A apresentam-se os valores, em percentagem, da eficiência de retenção de cada barragem, determinados, através das expressões de aproximação à curva de Brune apresentadas na secção 3.1.3, para as

barragens com valores do caudal integral médio anual fornecidos no inventário das barragens de Portugal feito pelo INAG.

A figura 4.17 apresenta um mapa da produção de sedimentos. Como se pode ver na figura, há uma zona de elevada produção na região norte do País, outra na região sul próximo da fronteira com Espanha e outra na zona de Évora e Campo Maior. Em Portugal é muito frequente a ocorrência de incêndios que adquirem graves dimensões durante o Verão, devastando por completo a vegetação em áreas com dimensões preocupantes. Este problema está associado ao transporte de sedimentos na medida em que a terra, quando protegida por vegetação oferece maior resistência aos processos de erosão, como já foi referido na secção 2.1, e portanto uma redução da área protegida por vegetação poderá traduzir-se num aumento da afluência de sedimentos aos cursos de água.

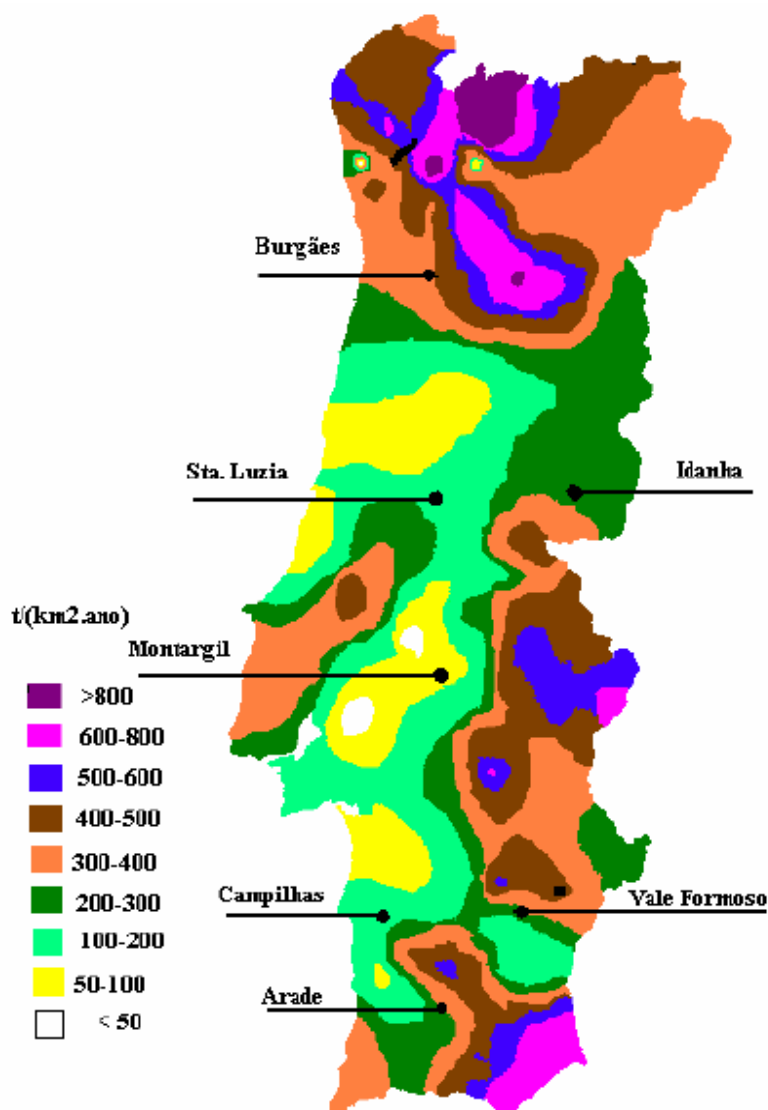


Fig.4.17 – Produção de sedimentos em Portugal (Couto e Rocha (1986), retirado de Rocha (1998)).

Em 1930, anteriormente à construção de barragens a afluência de sedimentos à costa norte portuguesa era de aproximadamente 2000000 m³/ano, com o próprio rio Douro a garantir 90% deste valor (Plano nacional da água, 2001). Hoje em dia o rio Douro só contribui com uma pequena quantidade, estimada

em 250000 m³/ano, como resultado da construção de barragens que tem reduzido a velocidade de escoamento e consequentemente a capacidade de erodir o leito do rio. A par disto, existe uma quantidade significativa de areia extraída para uso na construção civil, dragada do leito do rio em diversos lugares e em quantidades para além do que seria sustentável, Veloso Gomes *et al.* (2006).

Há pouca informação fiável sobre os volumes retirados nestas dragagens. Pode no entanto referir-se que só na parte de jusante do rio Douro, (que era um dos principais abastecedores sedimentares do litoral a Sul de Espinho), o volume de sedimentos dragados entre 1982 e 1986 foi de 3 milhões de m³. A extracção de areias e cascalhos, só no troço inferior do rio Douro, incluindo o estuário, figura 4.18, atingia também no início desta década valores da ordem de 1,5 milhões de m³ por ano. As consequências são patentes no progressivo agravamento das acções erosivas nas praias a sul da embocadura (PNA).

No rio Douro o transporte de sedimentos arenosos em direcção à embocadura depende da ocorrência de caudais (velocidades) muito elevados e da disponibilidade de fontes sedimentares a montante. Esse transporte é actualmente muito reduzido e irregular ao longo do ano e dos anos, em consequência da existência de uma cascata de aproveitamentos hidráulicos, da extracção de areias ao longo do rio e, a uma escala temporal mais alargada, à subida do nível médio da água do mar (PNA).

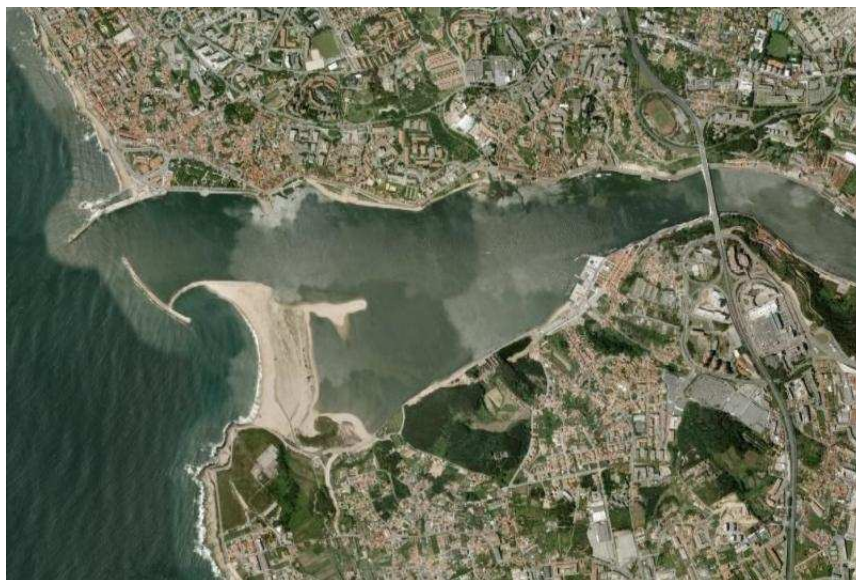


Fig.4.18 – Estuário do rio Douro.

No caso do volume de sedimentos afluente à laguna de Aveiro, figura 4.19, este foi estimado em 240000 m³ /ano em média, sem que praticamente as estruturas hidráulicas existentes interfiram com o seu transporte. O rio Vouga contribui com cerca de 75% deste caudal. Comparando os dois levantamentos hidrográficos gerais da Ria de Aveiro efectuados em 1952-53 e 1987-88, estimou-se, neste período de 35 anos, um aprofundamento médio de 0,4 m, em grande parte explicado pelas dragagens efectuadas para a abertura e manutenção da barra, cujos sedimentos são também vendidos para a construção civil. As obras realizadas na década de 50 na construção do molhe Sul e prolongamento do molhe Norte, terão originado uma erosão generalizada estimada em 6,5 milhões de m³ entre 1952 e 1960, 4,9 milhões de m³ entre 1961 e 1970 e 2,3 milhões de m³ entre 1971 e 1977 (PNA).

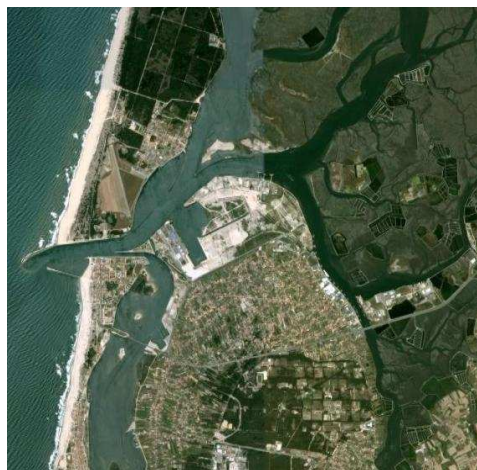


Fig.4.19 – Laguna de Aveiro.

O rio Minho transporta cerca de 806 000 m³ de sedimentos por ano, dos quais cerca de 15% são areias, o que contribuirá certamente para o assoreamento que se verifica nos troços finais do estuário, figura 4.20. Este assoreamento é atribuído à redução da frequência e intensidade das cheias, com menor capacidade de expulsão das areias da embocadura e/ou à predominância das correntes de enchente da agitação marítima, face às correntes de vazante. Este assoreamento justificará as recentes dragagens entre Caminha e Camposancos. No entanto essas dragagens, sobretudo as realizadas no canal de navegação de Caminha, poderão estar na origem de erosões em praias da zona estuarina de Camposancos e Molino e na zona costeira a Sul da embocadura (PNA).



Fig.4.20 – Estuário do rio Minho.

Do ponto de vista sedimentar o estuário do Tejo, figura 4.21, parece depender sobretudo de temporais e cheias, tendo estas, uma contribuição determinante. As taxas médias de sedimentação calculadas no período de 1983-1984 apontam para valores de 1,1 a 1,5 cm/ano. Entre 1928 e 1986, 65 % do material depositado terá permanecido no sistema sem ser remobilizado. Observa-se um intenso assoreamento na zona a montante do estuário, devido à perda de competência do sistema fluvial, e por constituir uma área preferencial de retenção de sedimentos. Durante a construção da Ponte Vasco da Gama dragaram-se no Tejo cerca de um milhão de m³ de sedimentos que estavam, em parte, contaminados (PNA).



Fig.4.21 – Estuário do rio Tejo.

No estuário do Sado, figura 4.22, o processo sedimentar é complexo e estima-se uma entrada de 15000 toneladas de sólidos suspensos por ano (SPM, referido no PNA). No estuário do Sado as cheias artificiais, resultantes das descargas controladas das albufeiras, contribuem significativamente para o presente balanço sedimentar no estuário.

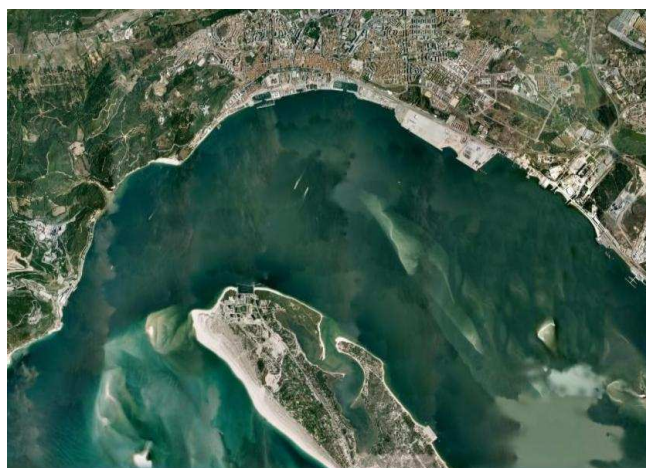


Fig.4.22 – Estuário do rio Sado.

Na Ria Formosa, figura 4.23, a dinâmica do sistema é dominada por processos relacionados com a ondulação. Nas ilhas, compridas e estreitas, de cordão dunar único, os galgamentos oceânicos são frequentes. Os processos relacionados com as marés dominam o comportamento sedimentar. O corpo lagunar definido por este sistema de ilhas barreira encontra-se preenchido, em grande parte, por

sedimentos finos. Verifica-se que os canais foram sendo progressivamente assoreados, constituindo o galgamento oceânico factor de assoreamento de grande importância. Procurou compensar-se este fenómeno com o Projecto de Requalificação do Sistema Lagunar, 1999/2000, que repulsou para a barreira da Ria Formosa cerca de 2,65 milhões de m³ de dragados, PNA.



Fig.4.23 – Ria Formosa.

A embocadura do rio Guadiana caracteriza-se pela transposição da barra por areias em ambos os sentidos, não constituindo os molhes Este e Oeste, actualmente, barreiras efectivas ao transporte aluvionar litoral, INAG (1998). No Guadiana uma consequência da redução de caudais, induzida pela perda hidrológica e regularização decorrente do enorme armazenamento instalado (70,4 % da bacia dominada em 1990), é a diminuição do fornecimento sedimentar, também às zonas costeiras adjacentes, com todas as suas consequências, PNA.

Em Portugal reconhece-se a importância da avaliação do assoreamento das albufeiras, e das suas consequências, assim como a necessidade da existência de um corpo permanente que se ocupe da sua análise. A necessidade de informação de caudais sólidos transportados, bem como das características e dinâmica do leito dos rios com vista à implantação de grandes obras hidráulicas, esteve na base do início da medição de transporte sólido no final da década de 60 e década de 70. A rede sedimentológica funcionou durante a década de 80 e princípio dos anos 90. Dessa rede existe informação relativa a caudal sólido em suspensão em 109 estações hidrométricas. Em alguns locais fizeram-se amostragens apenas durante um ou dois anos. Por outro lado, estas recolhas não foram efectuadas de modo regular, pelo que os elementos disponíveis são, muitas vezes, em número muito reduzido. Em 28 pontos de amostragem, para além de dados de transporte de sedimentos em suspensão, existe uma informação mais completa relativa às amostras de material de fundo para a caracterização das distribuições granulométricas e nas três estações da bacia do rio Lima apenas se recolheram amostras de fundo. No quadro 4.3 apresenta-se o número de estações com dados de caudal sólido e granulometrias de fundo para cada bacia hidrográfica onde se fizeram medições. Em alguns

locais de amostragem, o elevado número de dados constitui uma base preciosa para a caracterização temporal dessas secções, PNA.

Quadro 4.3 – Número de estações da rede sedimentológica em funcionamento até 1993/94 por bacia hidrográfica (retirado do PNA).

Bacia Hidrográfica	Tipo de Informação		
	Caudal sólido por arrastamento	Caudal sólido em suspensão	Granulometria de fundo
Âncora	0	1	1
Lima	0	0	3
Douro	1	12	6
Vouga	0	12	0
Mondego	3	24	1
Tejo	3	32	6
Lis	0	2	0
Sado	0	8	3
Guadiana	0	18	12
Rib ^a . Aljezur	0	1	0
Gião	0	1	1
Rib ^a . Quarteira	0	1	0
Portugal	7	112	33

Com base nos dados de granulometria do material de fundo, é possível construir as curvas granulométricas para cada amostra, figuras 4.24 e 4.25 e quadros 4.4 e 4.5, Álvares (1997), PNA.

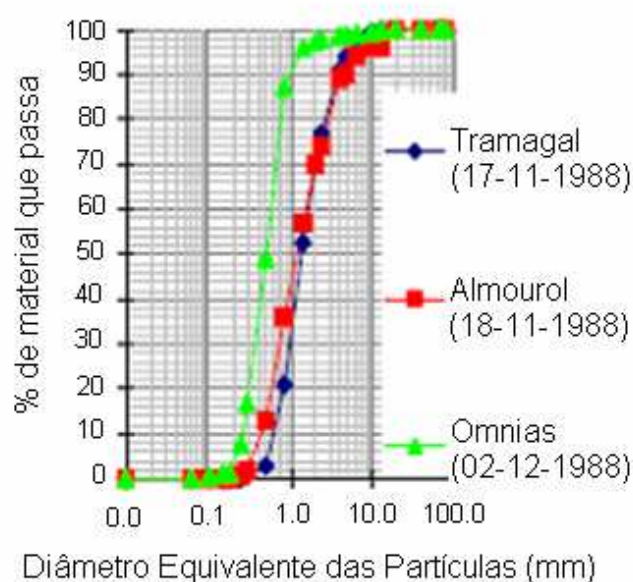


Fig.4.24 – Curvas granulométricas características para as estações do rio Tejo (Álvares (1997), retirado do PNA).

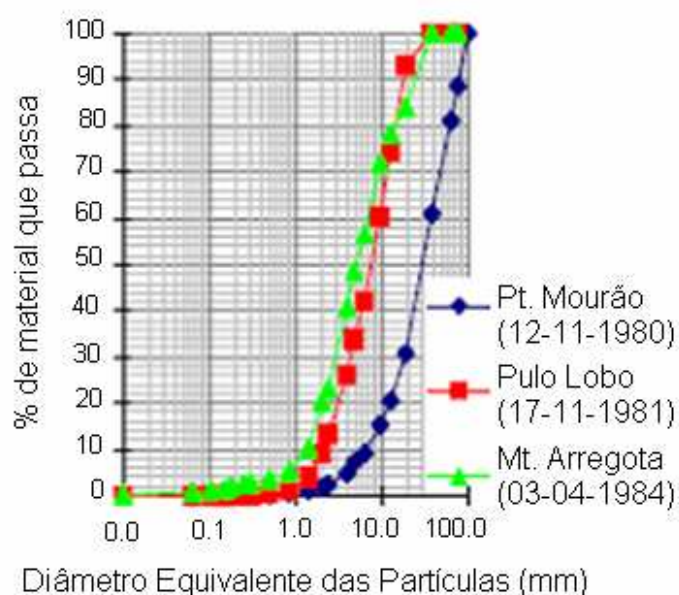


Fig.4.25 – Curvas granulométricas características para as estações do rio Guadiana (Álvares (1997), retirado do PNA).

Quadro 4.4 – Diâmetros característicos do material de fundo nas estações do rio Tejo (Álvares (1997), retirado do PNA).

Estação	Período de recolha	Diâmetro das partículas (mm)							
		Média				Desvio Padrão			
		D5	D20	D50	D90	D5	D20	D50	D90
Tramagal	1984/1990	0.44	0.66	1.34	5.22	0.08	0.11	0.52	3.29
Almourol	1984/1989	0.38	0.64	1.55	6.15	0.07	0.1	0.51	3.39
Ómnias	1984/1990	0.28	0.42	0.69	2.11	0.05	0.1	0.19	1.4

Quadro 4.5 – Diâmetros característicos do material de fundo nas estações do rio Guadiana (Álvares, 1997, retirado do PNA).

Estação	Período de recolha	Diâmetro das partículas (mm)							
		Média				Desvio Padrão			
		D5	D20	D50	D90	D5	D20	D50	D90
Mte. Arregota	1983/1990	0.56	2.18	7.05	27.26	0.66	3.58	10.82	16.95
Pte. Mourão	1979/1985	3.74	10.5	24.08	50.65	4.34	8.59	13.53	19.1
Pulo do Lobo	1980/1985	1.21	4.11	10.86	31.7	1.76	6.17	11.51	20

Como se pode observar, os sedimentos das secções de medição da bacia do rio Guadiana são bastante mais grosseiros, apresentando também uma maior variabilidade de valores dos diâmetros característicos, o que se explica pela maior torrencialidade dos regimes de escoamento nos cursos de água desta bacia, PNA.

A análise dos dados existentes, era muitas vezes difícil e inconclusiva, não permitindo uma caracterização válida dos regimes de transporte sólido e dos processos de sedimentação, uma vez que grande parte dos dados existentes apresentavam bastantes deficiências relativamente à frequência das recolhas e qualidade da informação.

Apesar da sua importância, as medições de caudal sólido nunca tiveram desenvolvimentos profundos e uma recolha de dados tão exigente como esta só se justifica se estiver a ser mobilizada pela comunidade técnica e científica com vista a uma adequada gestão de recursos hídricos.

Em 1990 deixaram de se recolher amostras de fundo, e em 1993 acabaram definitivamente as medições de caudal sólido em suspensão nas 10 estações que ainda se encontravam em funcionamento. Na figura 4.26 apresenta-se a evolução temporal das estações com medição de caudal sólido em funcionamento até 1993/94, PNA.

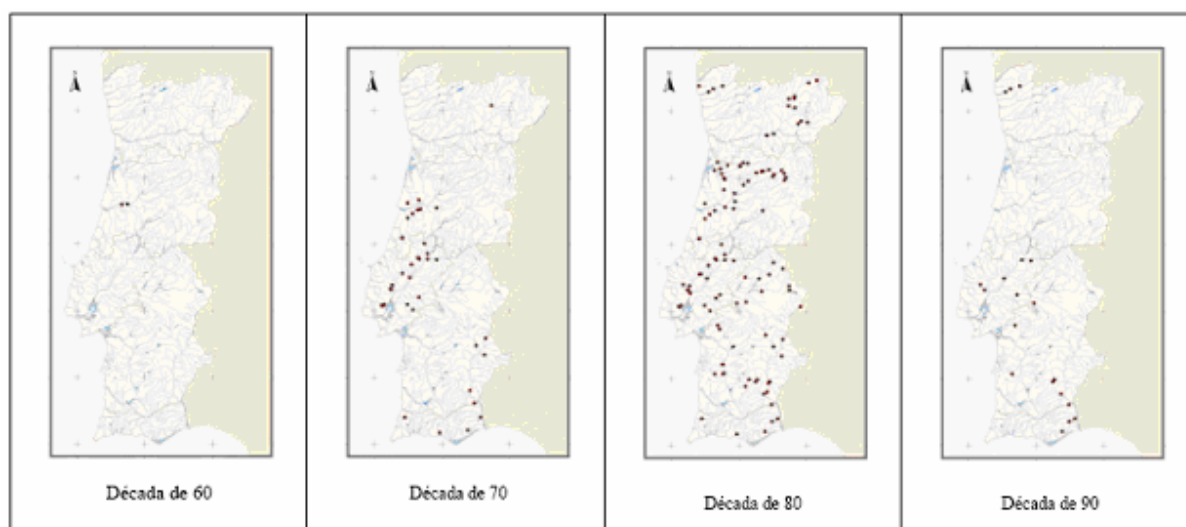


Fig.4.26 – Estações com medição de caudal sólido em funcionamento nas décadas de 60 a 90 (retirado do PNA).

A figura 4.27 apresenta um mapa dos dados de sedimentos em suspensão actualmente disponíveis, classificados relativamente à quantidade de anos de dados recolhidos.

Desde 1996, que o Instituto da Água (INAG) tem vindo a reestruturar as redes de monitorização de recursos hídricos, incluindo a rede sedimentológica. Com vista à segurança de estruturas hidráulicas e à monitorização e fiscalização de extracções de inertes, é necessário efectuar medições de caudal sólido e recolha de amostras de fundo, bem como executar simultaneamente levantamentos batimétricos. A nova rede sedimentológica compreende estações em cursos de água, onde serão efectuadas amostragens de caudal sólido e de granulometria de fundo, e estações em albufeiras onde serão realizados levantamentos batimétricos. Na figura 4.28 apresenta-se a localização das estações da nova rede sedimentológica, classificadas por tipo de estação: em albufeiras e em cursos de água – conforme documentos de Proposta de Reestruturação de Recursos Hídricos para Portugal Continental – a Sul do rio Tejo (INAG, 1998); entre Douro e Tejo (INAG, 2000); e a Norte do Douro (INAG, 2000), por Álvares *et. al* (2001).

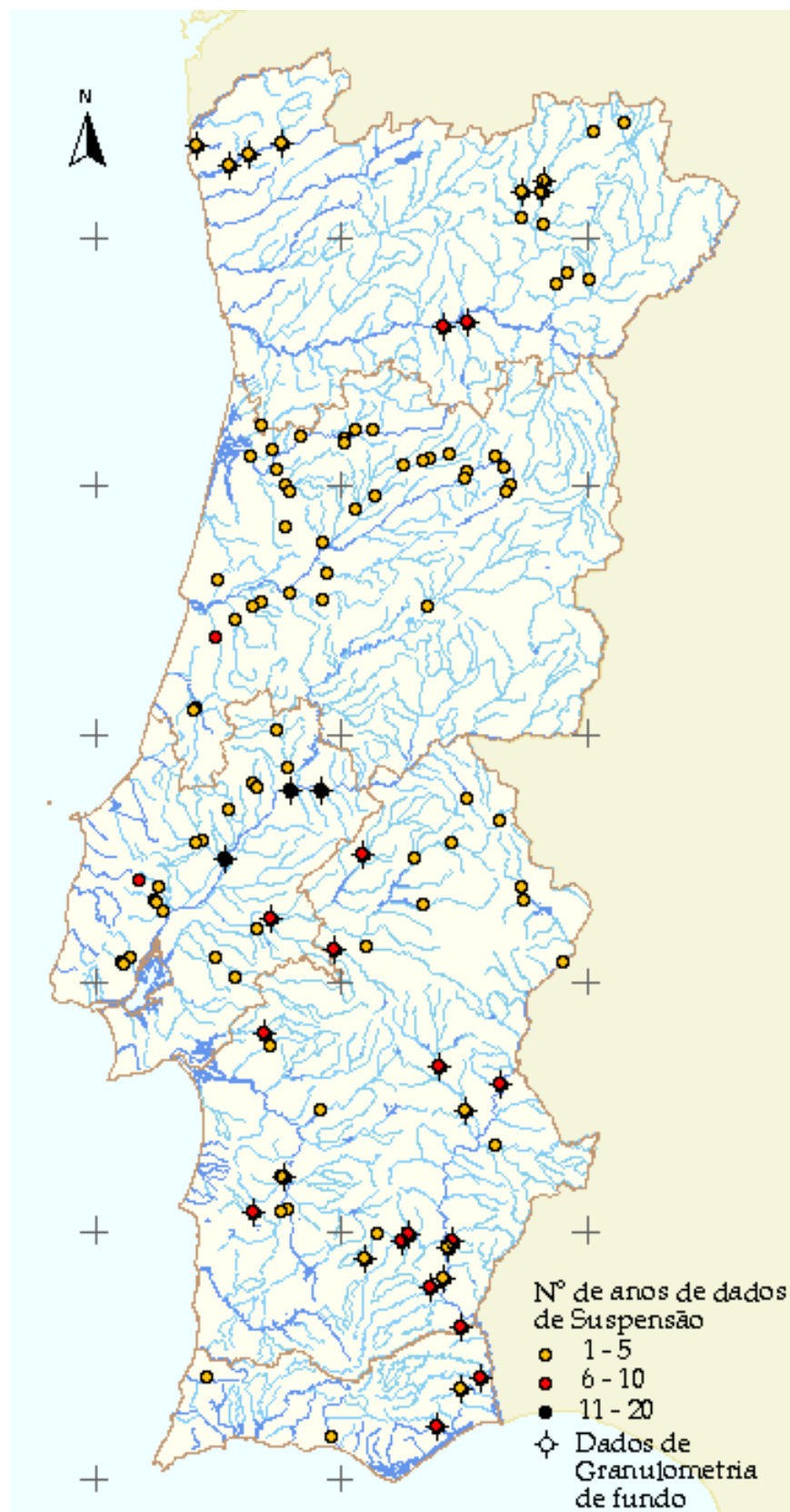


Fig.4.27 – Mapa de recolha de dados de sedimentos em suspensão
(http://snirh.inag.pt/snirh/semida/docs/rede_sed.html).



Fig.4.28 – Mapa das estações da nova rede sedimentológica de Portugal, Álvares et al. (2001).

Os principais objectivos da rede sedimentológica em implementação são, Pimenta *et al.* (1998):

- Determinação de caudais sólidos transportados e volumes depositados;
- Estabelecimento de relações caudal líquido/caudal sólido;
- Caracterização granulométrica dos sedimentos dos cursos de água;
- Caracterização química dos sedimentos;
- Avaliação das alterações funcionais de obras e estruturas hidráulicas;
- Garantir a existência de um conjunto de dados para calibração e validação de modelos matemáticos.

As preocupações que foram consideradas no início da medição de transporte sólido e sedimentação em albufeiras, tomam agora proporções muito maiores e mais determinantes, uma vez que se transita de uma concepção de rede de suporte a grandes obras hidráulicas para uma rede onde a componente de qualidade ambiental é a sua base estruturante. No entanto, não foram descuradas as acções de apoio à

segurança de estruturas hidráulicas. Foram contempladas acções de monitorização e fiscalização das extracções de inertes, onde deverão ser efectuados levantamentos batimétricos, medições de caudal sólido e recolha de amostras de fundo, a montante e jusante dos locais de extracção de areias, PNA.

Um dos principais objectivos da nova rede sedimentológica é a determinação da deposição de sedimentos em albufeiras, identificação de mecanismos de erosão/deposição (a partir de levantamentos batimétricos) e a caracterização do transporte sólido em cursos de água.

No anexo B apresentam-se as principais características das albufeiras que fazem parte da nova rede sedimentológica e as datas dos levantamentos batimétricos efectuados até 1998. Para cada albufeira é apresentado o valor de um índice de prioridade para execução dos levantamentos batimétricos, onde se ponderam factores como: existência de levantamentos batimétricos anteriores; urgência de serviço; índice de erosão potencial da bacia própria de cada albufeira; número de anos de funcionamento; incidência da sazonalidade no armazenamento e, estado trófico da albufeira nos meses preferenciais para o levantamento, Álvares *et al.* (2001).

A revitalização da rede sedimentológica proposta incidiu primeiro a Sul do rio Tejo (1998), região mais seca e vulnerável à erosão, os trabalhos de batimetria iniciaram-se em 1999, nas albufeiras da Vigia e do Roxo, para determinação da sedimentação e actualização das curvas de capacidade. Os levantamentos batimétricos realizados nas albufeiras estarão em curso até 2015, Álvares *et al.* (2001).

A existência de poucos estudos de avaliação da sedimentação em albufeiras, no que diz respeito à quantidade e distribuição dos sedimentos bem como a sua qualidade, torna necessário dispor de dados de batimetria e de amostras de sedimentos efectuados periodicamente o que representa um dos objectivos da redefinição da rede sedimentológica. Como a rede está em implementação os dados obtidos ainda não estão a ser divulgados, o que se espera venha a acontecer dentro em breve.

4.3.3. ESTIMATIVA E ANÁLISE DA SEDIMENTAÇÃO ACTUAL NAS PRINCIPAIS ALBUFEIRAS PORTUGUESAS

Apesar do esforço que está a ser feito no sentido de colmatar a falta de informação relativa ao transporte de sedimentos em Portugal, o volume de sedimentos depositado nas albufeiras permanece, nos dias de hoje, desconhecido e consequentemente também a real capacidade das albufeiras Portuguesas é desconhecida.

Há falta de informação acerca da sedimentação e portanto os dados que constituem a base deste estudo provêm do inventário de barragens Portuguesas feito pelo INAG. Para algumas barragens presentes no inventário mas com informação insuficiente, esta foi completada recorrendo ao site do SNIRH. As barragens presentes no inventário do INAG e portanto também objecto do presente estudo são genericamente barragens que obedecem ao critério de ter mais de 15 metros de altura, contados a partir da fundação, ou de ter mais de 1 hm³ (1 milhão de m³) de capacidade total de armazenamento.

Através, principalmente, dos valores apresentados pelo INAG para os volumes mortos e com recurso pontual a informação relativa à taxa de assoreamento retirada de outra referência (Lencastre e Franco, 2006), foi feita uma tentativa, ainda que grosseira, de determinar valores que, de alguma forma, possa reflectir a situação actual da sedimentação em Portugal.

Para as albufeiras com capacidade útil e total referidas no inventário do INAG mas sem informação relativa ao volume morto, este foi considerado igual à diferença entre a capacidade total e útil da albufeira. No cálculo considerou-se o volume morto de cada barragem, definido aquando da fase de projecto, como sendo o real volume de sedimentação actual verificado na albufeira com 50 ou mais anos de vida:

$$Volume_{Se\ dim\ entação} = Volume_{Morto} \quad (4.3)$$

e admitiu-se para as barragens com tempo de vida inferior a 50 anos que a sedimentação da albufeira seria directamente proporcional à idade da barragem:

$$Volume_{Se\ dim\ entação} = \frac{Volume_{Morto}}{50} \cdot idade_{Barragem} \quad (4.4)$$

Com o propósito de poder colmatar alguma falta de dados procedeu-se de forma similar à sugestão para a estimativa do volume de sedimentos depositado referida por Stigter *et al.* (1989) em que se estabelece uma relação empírica entre a área da bacia hidrográfica e o volume de sedimentos depositado.

Esta relação empírica foi estabelecida separadamente para as regiões geográficas norte, centro e sul numa tentativa de isolar os casos com condições de erosão e transporte de sedimentos semelhantes. Os valores obtidos através destas relações para o volume sedimentado que ultrapassaram a capacidade da própria albufeira foram ignorados. Os gráficos de correlação obtidos apresentam-se nas figuras 4.29, 4.30 e 4.31. O grau de correlação obtido é maior para as regiões do norte e sul do que para a região centro e embora não muito próximo da unidade para todas as regiões, considerou-se que as relações empíricas de potência estabelecidas serão capazes de fornecer valores do volume de sedimentação nas albufeiras com proximidade suficiente tendo em vista o contexto deste trabalho.

É portanto de salientar que os pressupostos base desta determinação foram adoptados com vista a obter uma ordem de grandeza, uma vez na presença de dados mais concretos e com vista a uma análise mais cuidada, tais pressupostos deixarão de fazer sentido.

No anexo 1 pode consultar-se a tabela com as características de todas as albufeiras consideradas neste estudo, assim como os valores estimados do volume de sedimentos depositado actualmente.

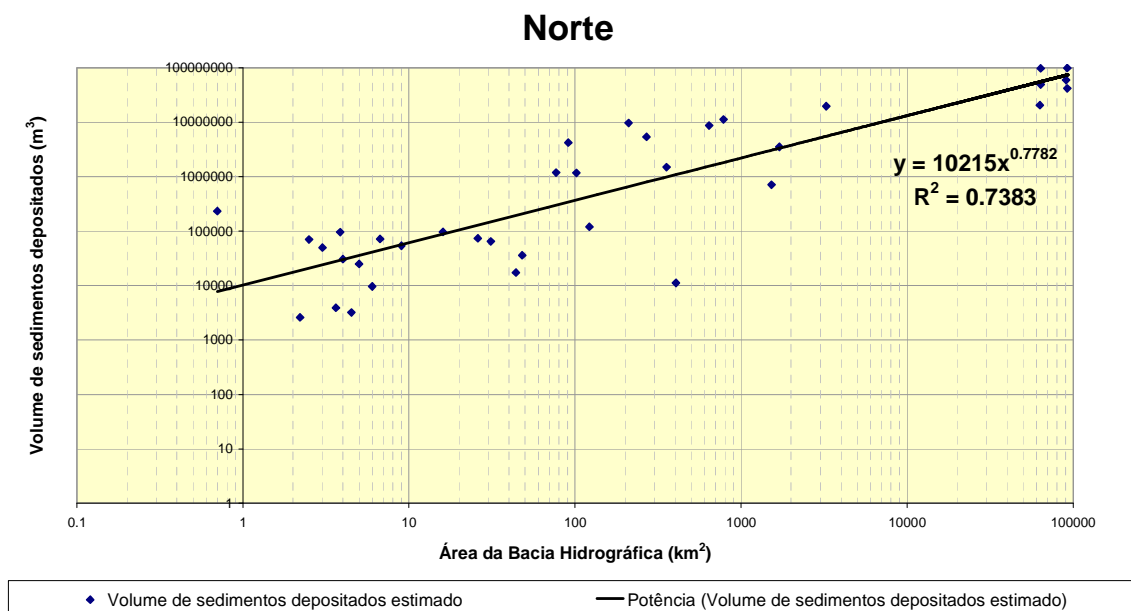


Fig.4.29 – Relação entre o volume de sedimentos depositados e a área da bacia hidrográfica para a região Norte.

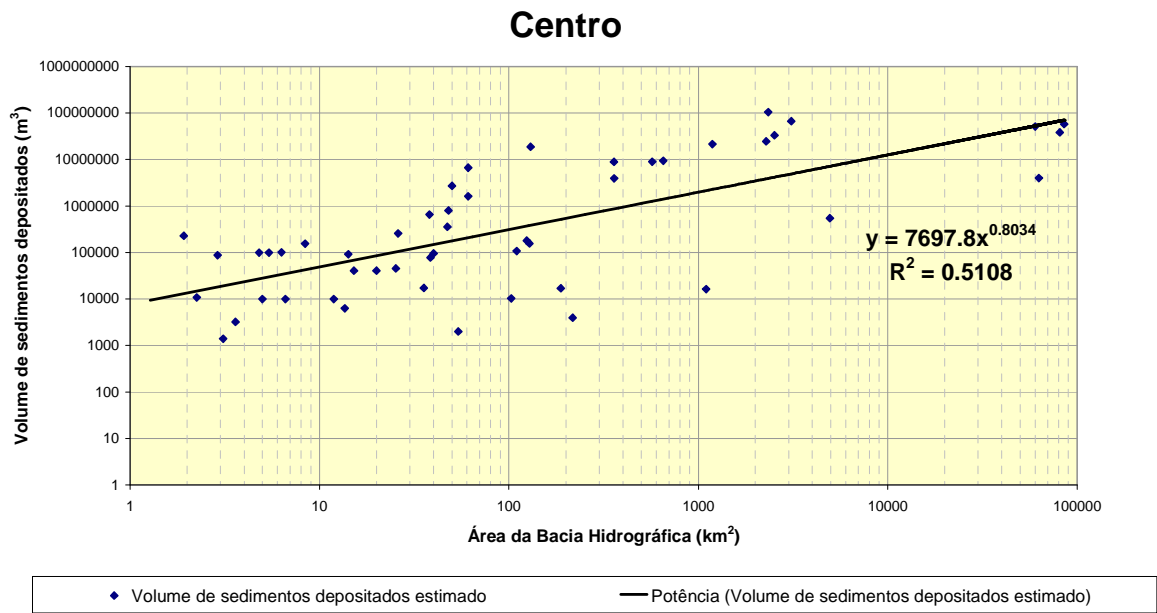


Fig.4.30 – Relação entre o volume de sedimentos depositados e a área da bacia hidrográfica para a região Centro.

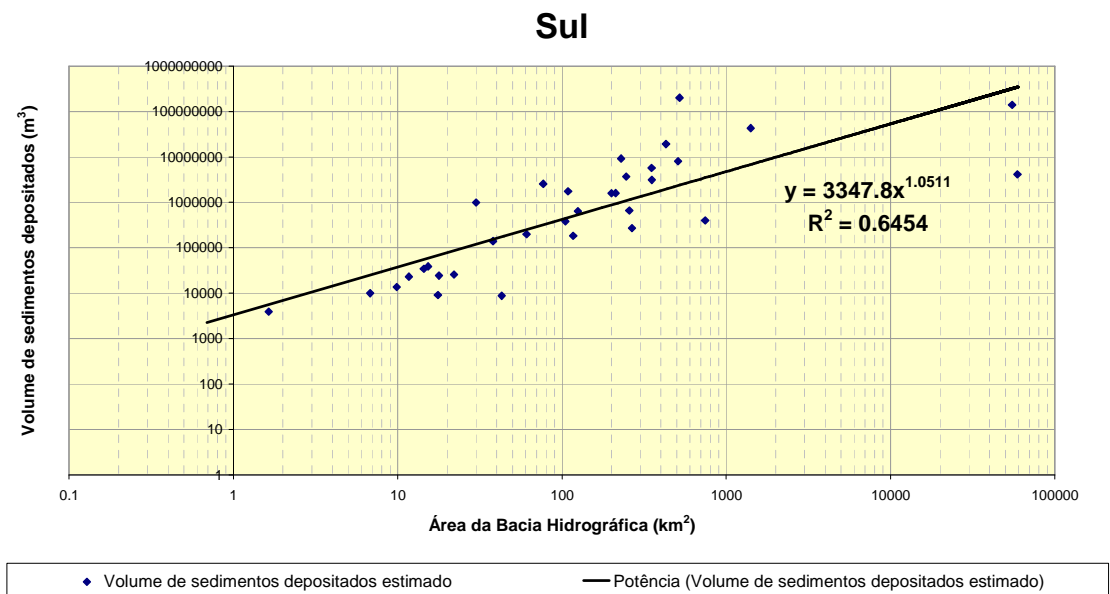


Fig.4.31 – Relação entre o volume de sedimentos depositados e a área da bacia hidrográfica para a região Sul.

O inventário do INAG é constituído por 166 barragens (anexo A) e foi possível reunir informação suficiente para estimar, pelos meios já enunciados, o volume de sedimentos depositado de 151 dessas 166 barragens. Estima-se que estas 151 barragens representam um volume total de sedimentos depositados de 1568 milhões de m³ e uma capacidade bruta total de 12546 milhões de m³, o que

significa que 12,5% da capacidade bruta total para o armazenamento de água estará, hoje, ocupada por sedimentos.

Das 151 albufeiras com volumes de sedimentação estimados, cerca de 66% têm um volume de sedimentação inferior a 10% da sua capacidade bruta de armazenamento, 28% estão sedimentadas entre 10% a 50% e somente 6% estão sedimentadas em mais de 50% da sua capacidade bruta de armazenamento.

Recorrendo ao software ArcGis as coordenadas das barragens foram referenciadas no Sistema de Informação Geográfica o que permitiu analisar o posicionamento das 166 albufeiras relativamente à costa Portuguesa, figura 4.32.

Portugal encontra-se actualmente dividido em 5 Regiões Hidrográficas que estão definidas na figura 4.33. Esta separação pareceu também a mais adequada uma vez que a observação do mapa permite uma leitura imediata da distribuição das albufeiras pelas respectivas Regiões Hidrográficas que têm jurisdição sobre as correspondentes áreas costeiras, sugerindo desta forma um caminho provável de administrar todo o processo de reaproveitamento dos sedimentos.

Das 166 albufeiras seleccionaram-se as que se localizam mais próximo da linha de costa. A selecção foi feita com recurso a uma ferramenta do ArcGis (buffer) que permite definir uma área constituída por pontos localizados a uma distância (em linha recta) inferior ou igual a um dado limite de uma linha de referência, que neste caso corresponde à linha de costa.

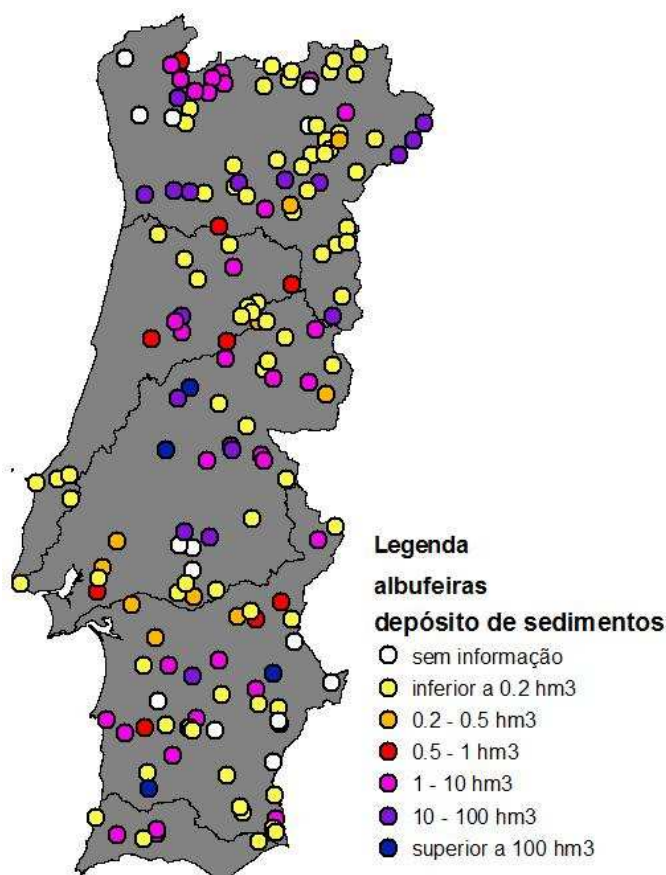


Fig.4.32 – Localização das 166 albufeiras presentes no inventário do INAG.

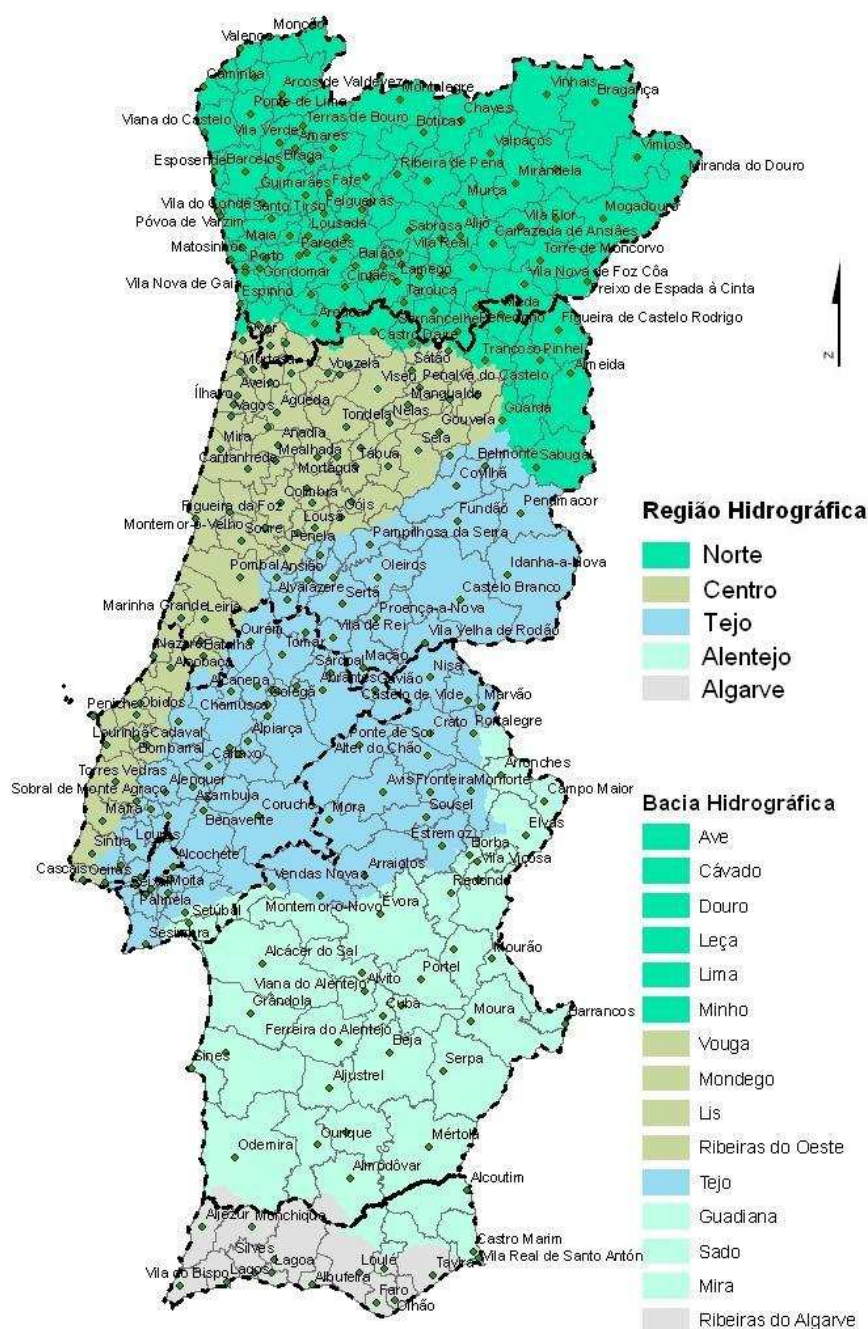


Fig.4.33 – Regiões Hidrográficas de Portugal (http://www.aprh.pt/texto/mapa-port_reg-hidrog.html).

Num estudo com uma maior exactidão estas distâncias deveriam ser determinadas em função das acessibilidades rodoviárias. Contudo, no contexto deste trabalho, este método surgiu como uma forma expedita e suficientemente elucidativa de estimar a proximidade das albufeiras à linha de costa. As figuras 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37 mostram respectivamente a localização das albufeiras situadas a menos de 25 km, entre 25 e 50 km, entre 50 e 75 km e entre 75 e 100 km da linha de costa.

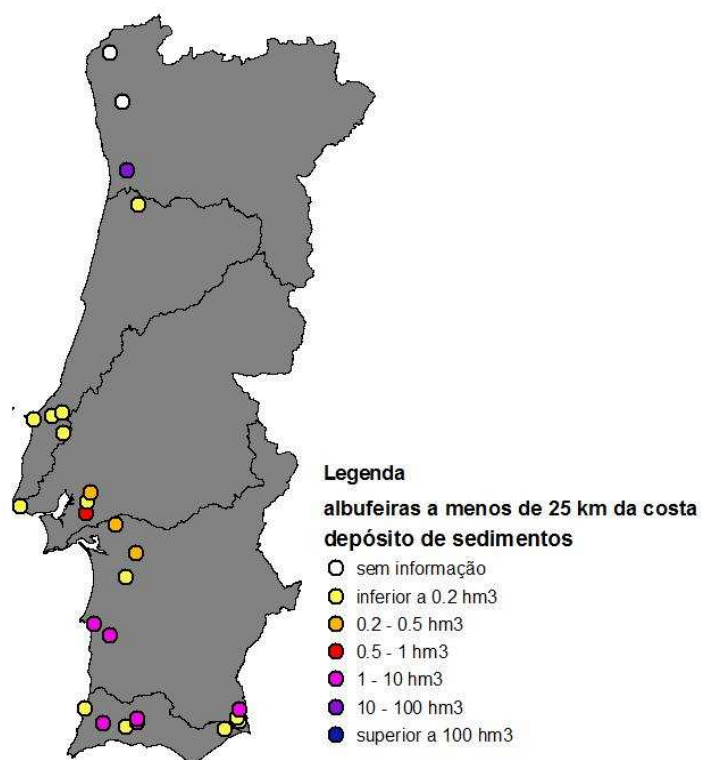


Fig.4.34 – Localização das albufeiras situadas a menos de 25 km da costa.

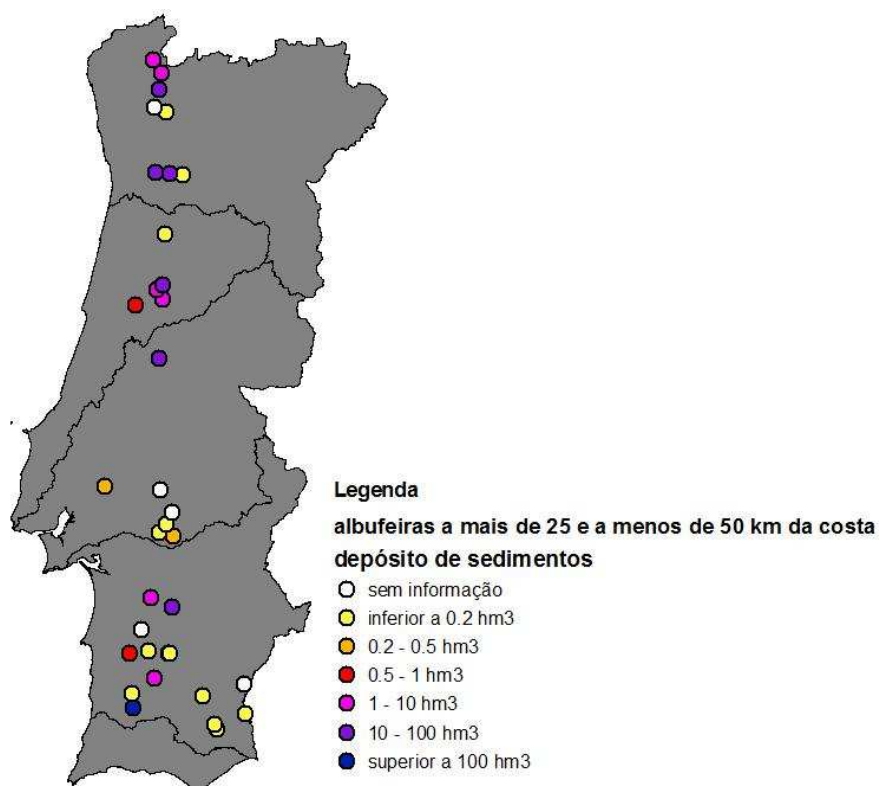


Fig.4.35 – Localização das albufeiras situadas a mais de 25 km e menos de 50 km da costa.

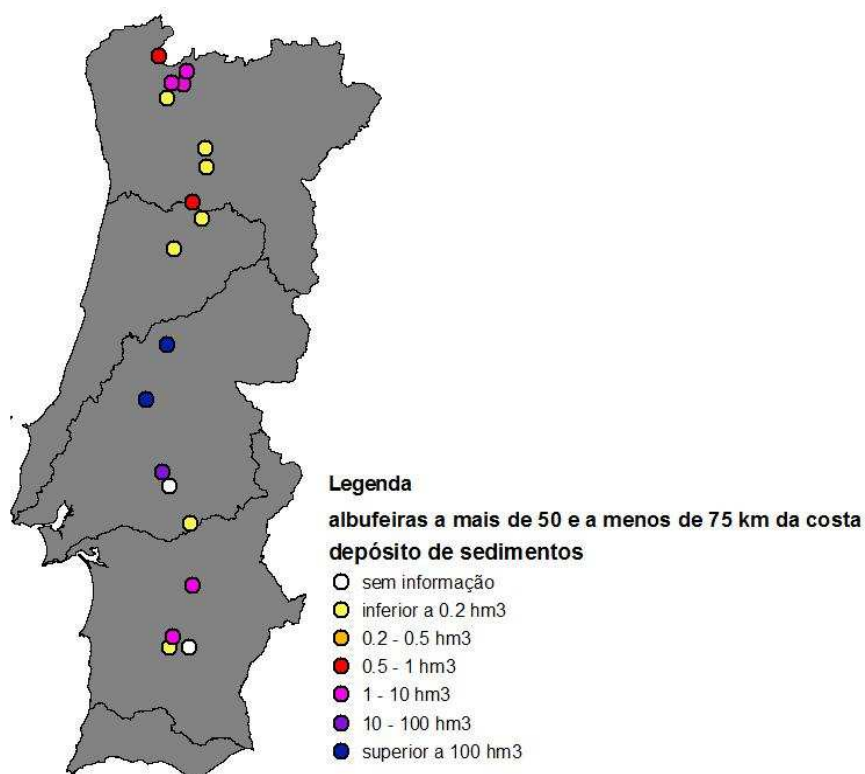


Fig.4.36 – Localização das albufeiras situadas a mais de 50 km e menos de 75 km da costa.

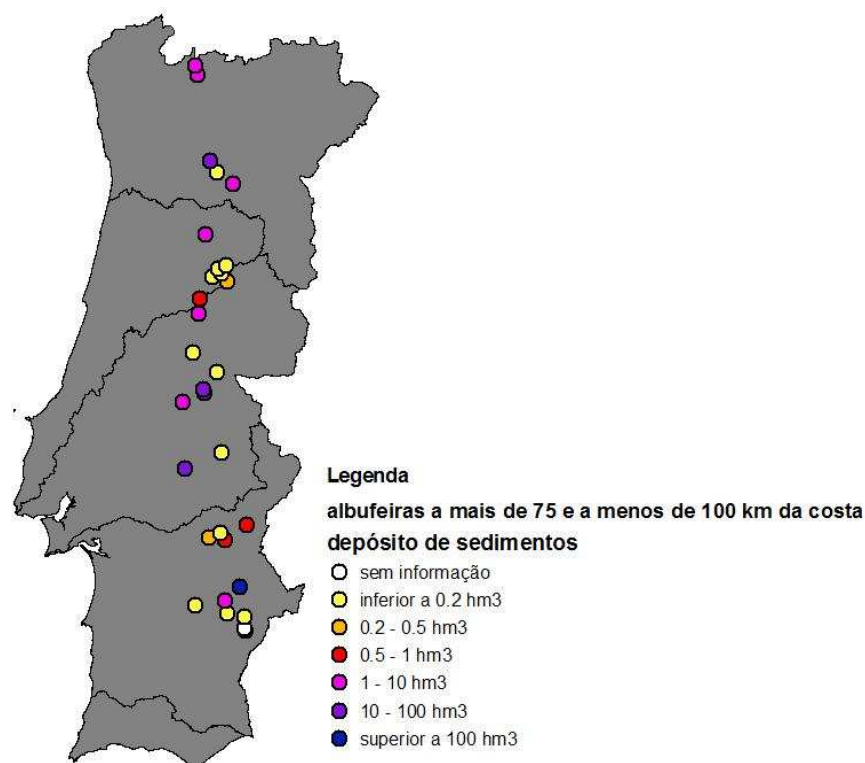


Fig.4.37 – Localização das albufeiras situadas a mais de 75 km e menos de 100 km da costa.

Num estudo realizado em Espanha como o mesmo fim de desenvolver projectos de reaproveitamento dos sedimentos para alimentação de praias os critérios de selecção das albufeiras a inserir em tais projectos foram os seguintes:

- Albufeiras com mais de $0,2 \text{ hm}^3$ de areia e localizadas a menos de 50 km da costa;
- Albufeiras localizadas a mais de 50 km e menos de 100 km da costa e com mais de $0,5 \text{ hm}^3$ de areia.

Num estudo mais avançado do problema seria importante avaliar a distribuição granulométrica dos sedimentos disponíveis em cada albufeira a fim de se poder determinar o volume de areia disponível. Na ausência de informação adoptaram-se os mesmos critérios de selecção mas relativamente ao volume total de sedimentos depositados:

- Albufeiras com mais de $0,2 \text{ hm}^3$ de sedimentos e localizadas a menos de 50 km da costa;
- Albufeiras localizadas a mais de 50 km e menos de 100 km da costa e com mais de $0,5 \text{ hm}^3$ de sedimentos.

Sendo estes critérios menos exigentes e dada a falta de informação que se fez sentir no desenvolvimento deste estudo, a selecção de albufeiras obtida representará uma pré-selecção de um conjunto de albufeiras que será necessário continuar a investigar antes de se poder decidir definitivamente acerca da sua inserção num projecto de reaproveitamento dos sedimentos para alimentação de praias. Das 166 albufeiras analisadas 53 foram seleccionadas representando na sua totalidade 1242 milhões de m^3 de sedimentos e 10968 milhões de m^3 de capacidade bruta para o armazenamento de água. Nos quadros 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 apresenta-se a selecção feita referente a cada região hidrográfica.

Quadro 4.6 – Albufeiras seleccionadas da Região Hidrográfica do Norte.

Região Hidrográfica do Norte				
Barragem	Linha de água	Volume de sedimentos (hm^3)	Distância à costa (km)	Prioridade para batimetria
CRESTUMA-LEVER	Rio Douro	42.000	<25	6
CANIÇADA	Rio Cávado	11.300	25-50	
CARRAPATELO	Rio Douro	99.574	25-50	
TORRÃO	Rio Tâmega	19.740	25-50	6
TOUVEDO	Rio Lima	3.520	25-50	6
VILARINHO DAS FURNAS	Rio Homem	1.191	25-50	9
ALTO LINDOSO	Rio Lima	0.714	50-75	6
PARADELA	Rio Cávado	5.400	50-75	8
SALAMONDE	Rio Cávado	8.700	50-75	
VALE SOEIRO	Rio Paiva	0.732	50-75	
VENDA NOVA	Rio Rabagão	1.500	50-75	
ALTO CÁVADO	Rio Cávado	1.170	75-100	
ALTO RABAGÃO	Rio Rabagão	9.693	75-100	8
RÉGUA	Rio Douro	59.760	75-100	
VILAR	Rio Távora	3.942	75-100	6
TOTAL		268.937		

Quadro 4.7 – Albufeiras seleccionadas da Região Hidrográfica do Centro.

Região Hidrográfica do Centro				
Barragem	Linha de água	Volume de sedimentos (m ³)	Distância à costa (km)	Prioridade para batimetria
AGUIEIRA	Rio Mondego	66.640	25-50	7
COIMBRA	Rio Mondego	0.549	25-50	
FRONHAS	Rio Alva	9.408	25-50	
RAIVA	Rio Mondego	5.264	25-50	
ALTO CEIRA	Rio Ceira	0.800	75-100	
FAGILDE	Rio Dão	1.001	75-100	4
TOTAL		83.662		

Quadro 4.8 – Albufeiras seleccionadas da Região Hidrográfica do Tejo.

Região Hidrográfica do Tejo				
Barragem	Linha de água	Volume de sedimentos (hm ³)	Distância à costa (km)	Prioridade para batimetria
VALE DO COBRÃO	Ribeira do Vale Cobrão	0.418	25	
VENDA VELHA	Ribeira da Asseiceira	0.758	25	
BOUÇA	Rio Zêzere	33.180	25-50	
MAGOS	Ribeira de Magos	0.384	25-50	
MINUTOS	Rio Almansor	0.401	25-50	
CABRIL	Rio Zêzere	105.000	50-75	7
CASTELO DO BODE	Rio Zêzere	194.500	50-75	7
MONTARGIL	Ribeira de Sôr	21.600	50-75	6
BELVER	Rio Tejo	4.000	75-100	
FRATEL	Rio Tejo	51.480	75-100	6
MARANHÃO	Ribeira de Seda	24.500	75-100	9
PRACANA	Rio Ocreza	42.900	75-100	6
SANTA LUZIA	Rio Unhais	2.700	75-100	
TOTAL		481.821		

Quadro 4.9 – Albufeiras seleccionadas da Região Hidrográfica do Alentejo.

Região Hidrográfica do Alentejo				
Barragem	Linha de água	Volume de sedimentos (hm ³)	Distância à costa (km)	Prioridade para batimetria
CAMPILHAS	Ribeira de Campilhas	1.739	<25	12
MORGAVEL	Ribeira de Morgavel	3.190	<25	
ODELEITE	Ribeira de Odeleite	3.120	<25	7
PEGO DO ALTAR	Ribeira das Alcáçovas	0.400	<25	7
VALE DAS BICAS	Ribeira da Landeira	0.256	<25	
FONTE SERNE	Ribeira de Vale Diogo	0.990	25-50	
MONTE DA ROCHA	Rio Sado	3.700	25-50	10
ODIVELAS	Ribeira de Odivelas	19.240	25-50	
SANTA CLARA	Rio Mira	200.654	25-50	7
VALE DO GAIO	Rio Xarrama	8.000	25-50	
ALVITO	Ribeira de Odivelas	1.600	50-75	6
ROXO	Ribeira do Roxo	5.712	50-75	12
ALQUEVA	Rio Guadiana	140.000	75-100	2
LUCEFECIT	Ribeira de Lucefécit	0.662	75-100	
PEDRÓGÃO	Rio Guadiana	4.160	75-100	
VIGIA	Ribeira do Vale de Vasco	0.641	75-100	10
TOTAL		394.064		

Quadro 4.10 – Albufeiras seleccionadas da Região Hidrográfica do Algarve.

Região Hidrográfica do Algarve				
Barragem	Linha de água	Volume de sedimentos (hm ³)	Distância à costa (km)	Prioridade para batimetria
ARADE	Rio Arade	9.224	<25	12
FUNCHO	Rio Arade	1.590	<25	8
ODEÁXERE (BRAVURA)	Ribeira de Odeáxere	2.565	<25	
TOTAL		13.380		

Como se pode concluir pela análise dos quadros as regiões hidrográficas do Tejo e Alentejo são as que apresentam uma maior quantidade de sedimentos disponíveis talvez devido à existência de regularizações de maiores dimensões. As regiões hidrográficas do Algarve e Centro correspondem a uma menor disponibilidade de sedimentos até porque são as regiões com menor quantidade de albufeiras analisadas. Nos quadros apresentam-se também os índices de prioridade para a realização

dos levantamentos batimétricos que estarão em curso até 2015, sendo que as albufeiras prioritárias correspondem aos índices mais elevados. De todas as albufeiras seleccionadas, 11 localizam-se a menos de 25 km da costa, 17 entre 25 e 50 km, 10 entre 50 a 75 km e 15 entre 75 a 100 km representando respectivamente 65, 484, 345 e 347 milhões de m³ disponíveis. Na figura 4.37 representa-se no mapa de Portugal a localização das 53 albufeiras seleccionadas.

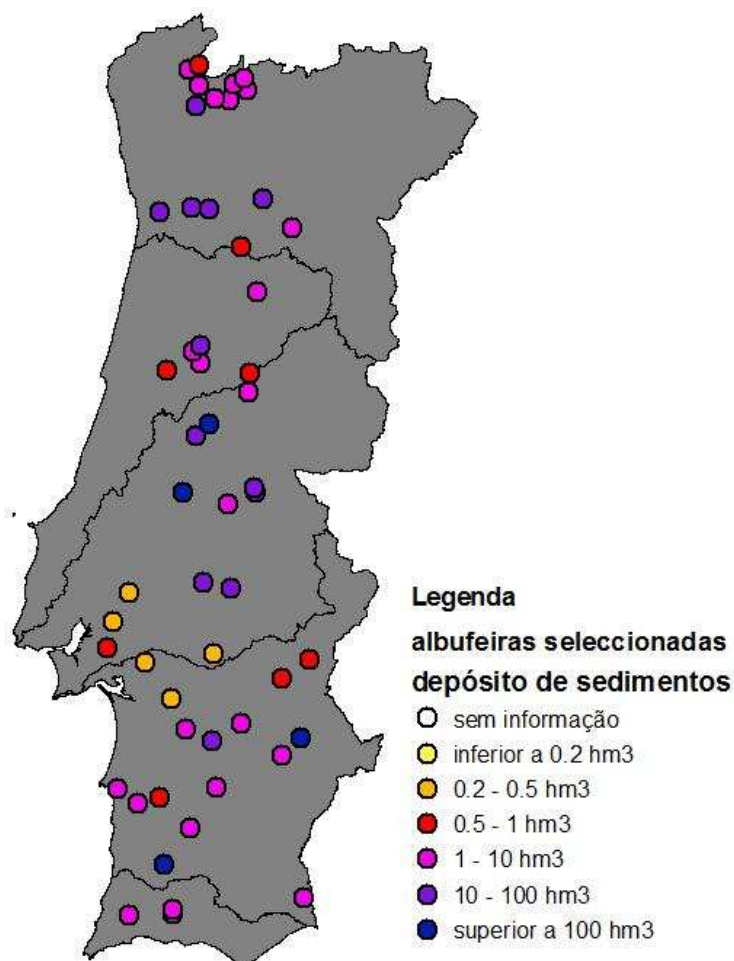


Fig.4.38 – Localização das albufeiras seleccionadas.

Apesar da relevância dada pelo Plano Nacional da Água à necessidade de melhor compreender o comportamento do transporte de sedimentos, não existe em Portugal, neste momento, uma estratégia delineada para a gestão dos sedimentos nas albufeiras. Contudo, em alguns locais, como por exemplo em troços do rio Tejo, onde se acumulam grandes quantidades de areia podem ser emitidas licenças para que se possa dragar o rio e aproveitar essa areia. Assim, os sedimentos transportados pelos rios são explorados e ainda que essa actividade esteja sujeita a uma autorização específica para o efeito, a falta de informação disponível relativa ao transporte sedimentar nos rios pode conduzir a uma indevida avaliação das condições em que tais explorações ocorrem. Na sequência de explorações de sedimentos sem uma estratégia bem definida, podem surgir problemas graves devido à erosão excessiva em alguns troços do rio, por exemplo junto a pilares de pontes (fig.4.38) podendo colocar em risco a segurança das estruturas fundadas no leito do rio. Também por isso é necessário desenvolver trabalho no sentido de estabelecer estratégias bem estruturadas que possam ser postas em prática de forma eficaz, tendo

em vista o aproveitamento tão exaustivo quanto possível dos sedimentos, desmotivando até a prática de explorações clandestinas.



Fig.4.39 – Deposição de sedimentos junto aos pilares de uma ponte (retirado de <http://www.urmi.pt/tramagal.htm>.)

“A redução do efeito de estufa das alterações climáticas, a que se associa a subida generalizada do nível médio das águas do mar e o agravamento da tempestuosidade, resultando no aumento das áreas imersas, áreas galgáveis e erosões, a conseguir-se, só terá resultados a médio prazo. Possivelmente esses resultados não irão além de uma desaceleração da evolução dos fenómenos. A redução do efeito de estufa envolve difíceis opções sociais e económicas a nível mundial. Não é previsível, pelo menos em relação às próximas décadas, que se altere a situação recente da crescente artificialização dos principais cursos de água anteriormente fornecedores de elevados montantes de sedimentos às zonas costeiras.

O transporte de areias para o local da alimentação constitui um problema técnico com custos a adicionar às operações de dragagem propriamente ditas. Por razões de segurança (ondas de cheia a jusante, deslizamentos de encostas a montante), por razões operacionais e grande dependência em relação ao regime hidrológico, seria praticamente irrelevante, em termos de aumento do caudal sólido, “exigir” às entidades concessionárias dos aproveitamentos hidroeléctricos um regime de exploração que desse prioridade ao aumento das “correntes de varrer” através da abertura de comportas. O transporte de areias por via terrestre tem custos muito elevados e impactes negativos significativos pelo elevado tráfico que gera, de ida e volta, para transportar por via terrestre uma elevada quantidade de sedimentos (da ordem das centenas de milhar a milhões de m^3). Os custos de transporte, os danos nos pavimentos das vias a utilizar e os conflitos de tráfego aumentam proporcionalmente com a distância a percorrer pelos veículos pesados. Outra questão crítica prende-se com a autorização a obter dos proprietários dos terrenos para concretizar a deposição e /ou a passagem de veículos (“dumpers”) no acesso às dunas. A alternativa, se viável, será realizar o transporte ao longo das praias. Esses impactes seriam reduzidos se o transporte fosse por via marítima, o que acontece quando as operações de transporte integram as próprias intervenções de dragagem.

As empreitadas de alimentação artificial de praias e dunas e as operações de transposição artificial de areias carecem de estudos técnicos, necessitam de financiamentos compatíveis e exigem um adequado relacionamento institucional entre as autoridades portuárias, as autoridades que tutelam as zonas costeiras e as autoridades de administração local. Mas urge implementá-las como forma de mitigar situações que podem vir a assumir proporções não controláveis. A colocação de areias nas praias, extraídas nas operações de dragagem e soluções de transposição (by-pass) aos quebramares, deixaram de ser hipóteses a encarar favoravelmente. Terão de ser uma exigência sob pena de se perder o controlo da situação.

Depois da actuação de meios terrestres de reperfilamento inicial, cabe às acções do mar a remobilização das areias de forma a reconfigurar o areal segundo perfis que variarão no tempo com as marés, com a agitação e com a movimentação de sedimentos. A referida reconfiguração por acção do mar evoluirá ao longo do tempo, sendo previsível, a exemplo do que sucedeu no passado, uma progressiva perda de areal. Não se podem criar expectativas quanto à criação de uma praia “definitiva” quando o histórico revelou uma situação de erosão resultante de um défice sedimentar. Um adequado programa de monitorização é essencial.”, Veloso Gomes (2009).

Com a consciência das dificuldades atrás referidas, e que estão inerentes a qualquer projecto de reaproveitamento dos sedimentos depositados nas albufeiras, é necessário reconhecer que a par dos graves problemas de erosão costeira, que hoje se fazem sentir com grande intensidade, existe um outro problema associado ao assoreamento das albufeiras, que representa actualmente uma muito menor preocupação para a sociedade em geral devido à menor intensidade com que se manifesta. Uma certeza pode desde já adiantar-se, na hipotética eventualidade de não se interferir, de forma alguma, com os sedimentos que, a taxas muito variáveis, se vão depositando nas albufeiras, será uma questão de tempo até surgir a necessidade de solucionar problemas relativos a albufeiras que deixaram de armazenar água e passaram a armazenar sedimentos. De facto os processos de erosão estão para ficar e as taxas de sedimentação nas albufeiras podem até, em alguns casos, ser reduzidas mas são seguramente superiores a zero, portanto quanto mais cedo se planear uma estratégia de actuação, menor será o esforço necessário para solucionar o problema.

Ao analisar o balanço custo-benefício de um projecto de reaproveitamento dos sedimentos depositados será necessário ter em conta não só o benefício que se poderá retirar a partir do reaproveitamento dos sedimentos para os mais diversos fins mas também a redução nos investimentos de defesa costeira, que têm assumido valores muito elevados, assim como o benefício associado à maximização do proveito retirado das barragens já construídas, que, por todos os grandes impactos que representam (quer socio-económicos quer ambientais), justificam a realização de trabalhos de manutenção que potenciem ao máximo as suas funções, reduzindo assim a necessidade de construir novas barragens. A redução da rentabilidade dos aproveitamentos hidroeléctricos devido à deposição dos sedimentos será tão mais significativa quanto maior for a capacidade de regularização da albufeira. Em albufeiras de armazenamento de água inter-anuais todos os sedimentos afluentes se depositam, reduzindo a capacidade de regularização da albufeira que é o objectivo fundamental deste tipo de aproveitamentos. Em aproveitamentos a fio de água a eficiência de retenção de sedimentos pode ser reduzida e portanto uma considerável parte dos sedimentos consegue passar para jusante da barragem. Para além disso, este tipo de aproveitamentos utiliza a água afluente de forma imediata pelo que a perda de capacidade de regularização pela deposição de sedimentos não terá grande significado.

Será também necessário ter presente que cada albufeira tem as suas características específicas assim como cada curso de água e portanto não será possível alcançar uma solução única para o problema. Pode considerar-se que os impactes relativos ao transporte de sedimentos por via terrestre são o factor mais condicionante na viabilidade dos projectos de reaproveitamento. Portanto, deveria optar-se por

soluções alternativas sempre que possível. Se em determinados casos a criação de ondas de cheia para “varrer” os sedimentos poderia ter consequências graves talvez existam casos em tal até possa ser exequível, contudo esta seria uma operação que, pela dimensão que as suas consequências podem adquirir, exigiria a realização de estudos prévios assentes em bases sólidas que permitissem prever todas as consequências inerentes. Os rios Douro, Tejo, Sado e Guadiana são navegáveis a distâncias do mar variáveis, no caso do rio Douro até cerca de 200 km, nos rios Sado e Guadiana até cerca de 70 km (<http://www.eb1-gafanha-nazare-n2.rcts.pt/rios.htm>). Portanto poderia pensar-se em soluções de transporte de sedimentos com recurso a batelões para as albufeiras localizadas nos troços navegáveis destes rios, no entanto estes batelões deveriam estar preparados para navegar também no mar até aos locais a alimentar o que poderá implicar a necessidade de modificar os batelões, aumentando assim os custos da operação, pelo menos inicialmente.

Por tudo isto, e uma vez que se investe actualmente na revitalização das redes sedimentológicas pretende-se com este trabalho alertar a comunidade técnica e científica para a excelente oportunidade criada com o estudo do comportamento dos sedimentos e de mapeamento dos locais de deposição, permitindo definir estratégias de aproveitamento dos sedimentos de forma mais eficiente e segura.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. CONCLUSÕES

É importante começar por referir que os sedimentos das albufeiras podem ser utilizados como um recurso e não como um resíduo. A componente de areia pode ser utilizada para a alimentação de praias enquanto que o resto poderia ser utilizado para outros fins, como por exemplo para aplicação na construção civil. Para além disso, o recurso a meios de remoção dos sedimentos depositados permitirá a reabilitação das albufeiras que sofrem actualmente com a sedimentação, recuperando a sua capacidade inicial de armazenar água.

Com vista a uma melhor compreensão de toda a dinâmica associada ao transporte de sedimentos descreveu-se de forma exaustiva todo o processo de formação e transporte de sedimentos e apresentaram-se casos internacionais que ilustram problemas sofridos e soluções adoptadas com vista a uma melhor gestão dos recursos sedimentares. Em complemento apresentou-se a teoria em que assenta todo o processo assim como as diversas metodologias de avaliação da sedimentação. Por fim, sintetizou-se informação relativa às diversas formas de controlo e remoção de sedimentos depositados nas albufeiras, referiu-se o tratamento necessário ao reaproveitamento dos sedimentos, com vista à alimentação artificial de praias e analisou-se a situação Portuguesa actual com base no conhecimento dos volumes mortos relativos a algumas albufeiras e tendo como finalidade a obtenção de uma ordem de grandeza da quantidade de sedimentos disponível actualmente no País. O valor estimado obtido foi de 1568 milhões de m³.

No entanto, e apesar do esforço efectuado no sentido de colmatar a falta de informação relativa ao transporte de sedimentos em Portugal, o real volume de sedimentos depositado nas albufeiras permanece, nos dias de hoje, desconhecido e consequentemente também a real capacidade das albufeiras Portuguesas é desconhecida.

Desenvolveu-se este trabalho como um ponto de partida e até como incentivo à realização de outros estudos que o possam completar e melhorar, com o objectivo de, no fim, se poder ver implementado um esquema nacional de aproveitamento dos sedimentos que se considera ser uma mais-valia para a economia do país e que se encontram hoje na sua grande maioria completamente desaproveitados.

Este estudo apresentou os principais requisitos para viabilizar um projecto de utilização dos sedimentos depositados nas albufeiras em alimentação artificial de praias. Foram seleccionadas 53 albufeiras de acordo com a sua proximidade à linha de costa e com o volume de sedimentos disponível, estimado essencialmente com base nos valores dos volumes mortos das albufeiras. Esta pré-selecção necessita de continuar a ser investigada com base em dados mais precisos que possam

conduzir a uma selecção mais rigorosa e tendo em conta os seguintes parâmetros que condicionam a implementação de um esquema de aproveitamento de sedimentos numa albufeira:

- Do ponto de vista das albufeiras: para além da proximidade à linha de costa e da grande quantidade de areia disponível, viabilidade de transporte, compatibilidade entre extracção e exploração, de preferência com localização fora de áreas de protecção especial, área de armazenamento disponível para secagem e selecção do material antes de ser transportado, ausência de estruturas (ex. pontes) fundadas nas proximidades do local de extracção.
- Do ponto de vista dos sedimentos: distribuição granulométrica conhecida e d_{50} compatível com a praia para onde serão transportados, baixas concentrações de metais e contaminação, pois a necessidade de descontaminação iria aumentar significativamente o custo do projecto.

Este tipo de projecto implica a coordenação das partes envolvidas: água, autoridades costeiras e ambientais, promotores industriais. Requer também transparência com os utilizadores: habitantes, pescadores e proprietários das terras circundantes às albufeiras.

É muito complexa a avaliação da viabilidade de um projecto de aproveitamento dos sedimentos retidos nas albufeiras, devido à quantidade e natureza de variáveis envolvidas. Estes projectos carecem de estudos técnicos e financiamentos compatíveis e portanto, também, de muita vontade política.

5.2. SUGESTÕES

A fim de se poder validar a pré-selecção de albufeiras apresentada deveria proceder-se à recolha de amostras dos sedimentos depositados nas albufeiras para permitir traçar a curva granulométrica e prever a representatividade da fracção de areia, interessando que seja o mais elevada possível para reduzir os custos de extracção, tratamento, transporte e colocação. As mesmas amostras recolhidas serviriam também para a realização de análises expeditas a fim de avaliar uma eventual necessidade de descontaminação das areias e também das restantes fracções que seriam aproveitadas para outros fins. Como a recolha de amostras implicaria sempre uma visita ao local seria conveniente a realização de uma lista de parâmetros de interesse que possam ser também registados nessa mesma visita, como por exemplo a eventual presença de detritos em suspensão, a cor da água, que poderão ser importantes indicadores ambientais, a eventual existência de espaço para deposição e tratamento dos sedimentos próximo do local da albufeira, o tipo de acessibilidades, etc.

Por outro lado, importa manter em funcionamento a rede sedimentológica que se encontra em reestruturação, pois somente através da medição sistemática e regular dos sedimentos se podem definir teorias e calibrar modelos matemáticos que permitam no futuro prever as afluências de sedimentos às albufeiras com alguma segurança. Para se conseguir estudar toda a dinâmica do processo de transporte de sedimentos será necessário dispor de uma grande quantidade de dados que terão de ser recolhidos ao longo de muito tempo. É de realçar a importância do facto de poder ser desmotivante o investimento numa rede de estações de medição que ao fim de 4 ou 5 anos de funcionamento ainda não fornece dados suficientes para a realização de estudos de previsão das afluências de sedimentos aos cursos de água, devido ao facto do transporte de sedimentos ser, como já foi referido, muito variável de ano para ano. Portanto será fundamental insistir na manutenção de tais esquemas de medição, sendo também importante pensar em formas de otimizar os custos de operação na recolha de amostras e de custos de manutenção das estações de medição, de forma a poder garantir a sua permanência em funcionamento, visto que a sua activação apenas por um ou dois anos, pouco ou nada

contribuirá para a compreensão do problema, podendo no entanto representar um elevado investimento.

Como a erosão que se manifesta, hoje, ao longo da costa portuguesa está longe de ser natural, o mesmo se passa com a deposição de sedimentos que ocorre ao longo do curso dos rios e portanto seria importante definir estratégias globais de aproveitamento dos sedimentos depositados, tendo em vista não só a alimentação de praias mas também todos os outros potenciais fins para que poderão servir. Isto porque, como foi visto, existem diversos factores que podem inviabilizar o projecto de reaproveitamento dos sedimentos com o fim de alimentar as praias, pelo que o investimento feito em estudos de viabilidade pode ser optimizado caso se considerem, paralelamente, outros possíveis fins. Sugere-se, desta forma, que se defina uma estratégia global de aproveitamento dos sedimentos ainda que para tal seja necessário uma análise caso a caso, na tentativa de rentabilizar ao máximo cada projecto.

BIBLIOGRAFIA

- Álvares, Maria Teresa, Fernandes, Sónia, Mariano, Ana Catarina, Veríssimo, Maria Raquel (2001). *Plano de Trabalhos para Execução de Levantamentos Batimétricos nas Albufeiras da Rede Sedimentológica*. Instituto da Água – Direcção de Serviços de Recursos Hídricos.
- Álvares, Maria Teresa, Fernandes, Sónia, Mariano, Ana Catarina, Pimenta, Maria Teresa (2000). *Monitorização batimétrica para gestão de albufeiras: Estudo Piloto*. IX SILUBESA, 2000, Porto Seguro - Brasil.
- Autoridade Portuária de Veneza (2004). *Sediment Treatment Pilot Project Interim Report*. Veneza - Itália.
- Basson, G. R., Rooseboom, A. (1999). *Dealing with reservoir sedimentation*, Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD), Paris.
- Batuca, Dan G., Jordaan, Jan M. (Jr) (2000). *Silting and Desilting of Reservoirs*. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Costa, Ana Luísa Ribeiro da (2005). *O Assoreamento das Albufeiras Hidroeléctricas e a “Erosão” das Praias*. Dissertação de Mestrado, Escola de Ciências da Universidade do Minho.
- Fernandes, Sónia, Mariano, Ana Catarina, Álvares, Maria Teresa, Veríssimo, Maria Raquel, Carlão, Brito (2002). *Relatório técnico sobre o estudo do leito de cheia num troço do rio Mondego*. Instituto da Água – Direcção de Serviços de Recursos Hídricos.
- Fonseca, Rita Maria Ferreira da (2002). *Impactos ambientais associados a barragens e a albufeiras. Estratégia de reaproveitamento dos sedimentos depositados*. CGE/Universidade de Évora.
- Helland-Hansen, Erik, Holtedahl, Truls, Lye, Kåre Arnstein (2005). Environmental issues and relationships. In *Environmental Effects*, páginas 81-87. Norwegian University of Science and Technology, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Trondheim, Noruega.
- Lencastre, A., Franco, F. M. (2006). *Lições de Hidrologia*, Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica.
- Lysne, Dagfinn, Glover, Brian, Støle, Håkon, Tesaker, Einar (2003). Sediment transport and sediment handling. In *Hydraulic Design*, páginas 117-155, Norwegian University of Science and Technology Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Trondheim, Noruega.
- Maia, Alfredo (2009). *Recuperação de praias custou 18 milhões em 2008*. Jornal de Notícias, 21/04/2009, página 30.
- Martín-Rosales, Wenceslao, Pulido-Bosch, Antonio, Gisbert, Juan, Vallejos, Angela (2003). *Sediment yield estimation and check dams in a semiarid area (Sierra de Gádor, southern Spain)*. Erosion prediction in ungauged basins: Integrating Methods and Techniques (Proceedings of symposium HS01), Julho de 2003, IAHS Publicação número 279, Sapporo.
- Molino, B. (2003). *Environmental Protection in Processes of Reservoir Restoration and Use of Sediments*. UNESCO/ICCORES Workshop: From watershed slopes to coastal areas: sedimentation processes at different scales, 3-5 de Dezembro de 2003, Session 3, Paper 2, Veneza, Itália.
- Pétavy, F., Ruban, V., Conil, P. (2008). *Treatment of stormwater sediments: Efficiency of a attrition scrubber – laboratory and pilot-scale studies*. Chemical Engineering Journal, 28/04/2008, página 477, Elsevier B. V.

Pimenta, Maria Teresa, Santos, Maria João Álvares, Maria Teresa, Rodrigues, Rui, Lacerda, Manuel (1998). *Reestruturação das Redes de Monitorização II – Redes Meteorológica, Hidrométrica e Sedimentológica a Sul do Rio Tejo*. Congresso da Água.

PNA - Plano Nacional da Água. Capítulos 5, 7, 8 e 10 do II Volume.

Rocha, J. S. (1998). *O assoreamento das albufeiras e o ambiente*. Seminário Barragens e Ambiente, Porto.

Sánchez, Virgínia (2008). *Sedimentation of the spanish reservoirs as sand source for beach nourishment*. Área de Estudos de Costas, Centro de Estudos de Portos e Costas (CEDEX), Madrid - Espanha.

Spreafico, Manfred, Grasso, Alessandro (2003). *Sedimentation in natural lakes in mountain areas—experiences from Switzerland*. UNESCO/ICCORES Workshop: From watershed slopes to costal áreas: sedimentation processes at different scales, 3-5 de Dezembro de 2003, Session 2, Paper 3, Veneza, Itália.

Stigter, C., Post, G. R., Keyser, D. J., Strand, R. I. (1989). *Sedimentation Controlo of Reservoirs*, Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD), Paris.

Støle, Håkon (1992). *Water and Sediment Resources in Reservoirs*, Sintef NHL, Trondheim, Noruega.

Støle, Håkon (1993). *Withdrawal of water from Himalayan Rivers*. Dissertação de Doutoramento, Nowegian University of Science and Technology.

Støle, Håkon (2008). Material de apoio às aulas de Headworks and Sedimentation leccionadas na Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU).

Veloso-Gomes, Fernando (2009). *Alimentação Artificial de Praias a Sul da Barra de Aveiro*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Veloso-Gomes, Fernando, Taveira-Pinto, Francisco, Neves, Luciana das, Barbosa, Joaquim Pais (2006a). *O Projecto EUrosion. Resultados e recomendações para uma gestão mais eficaz da erosão costeira*. 8º Congresso da Água (FCTUC), 13/03/2006, Figueira da Foz, páginas 1-9, IHRH-FEUP, Porto.

Veloso-Gomes, Fernando, Taveira-Pinto, Francisco, Neves, Luciana das, Barbosa, Joaquim Pais (2006b). *EUrosion – Pilot Site of River Douro – Cape Mondego and Case Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale do Lobo and Azores*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos.

Wang, Zhao-Yin (2003). *Sedimentation in the Yellow River and Estuary Managements Strategies*. UNESCO/ICCORES Workshop: From watershed slopes to costal areas: sedimentation processes at different scales, 3-5 de Dezembro de 2003, Session 3, Paper 1, Veneza, Itália.

Referências disponíveis em sites da Internet:

http://www.sanasa.com.br/noticias/not_con3.asp?par_nrod=555&flag=TK-2 (12/01/2009)

http://sites.google.com/site/geologiaebiologia/_/rsrc/1219775711387/Home/geologia-problemas-e-materiais-do-quotidiano/bacias-hidrogr%C3%A1ficas (30/01/2009)

http://www.dha.Inec.pt/nre/english/projects/sedim_eng.html (05/02/2009)

<http://homepage.ntlworld.com/paul.j.parkinson/photos.html> (09/02/2009)

<http://www.thunersee.com> (13/02/2009)

<http://www.rickly.com/ss/bedmaterial.htm> (22/02/2009)

http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/sedim/e_bed.htm (09/03/2009)

<http://lindorm.com/products/nilsson.php> (11/03/2009)

<http://www.rickly.com/sai/VASTA99.htm> (15/03/2009)

<http://www.kitmondo.com/images%5Clisting%5CBeckmann%20Coulter.jpg> (20/03/2009)

http://www.allposters.co.uk/-sp/The-All-American-Canal-as-the-Blazing-Sun-Sets-in-the-West-near-Yuma-Arizona-Posters_i3991549_.htm (03/04/2009)

<http://www.urmi.pt/tramagal.htm> (27/04/2009)

<http://www.gendredge.com/nigeria/bucket.php> (06/05/2009)

http://snirh.inag.pt/snirh/semida/docs/rede_sed.html (08/05/2009)

http://www.aprh.pt/texto/mapa-port_reg-hidrog.html (12/05/2009)

<http://www.eb1-gafanha-nazare-n2.rcts.pt/rios.htm> (15/05/2009)

Anexos

Anexo A - Características das Albufeiras Analisadas																					
BARRAGEM	Ano de Conclusão	Tipo de Barragem	Distrito	Concelho	Região	Região Hidrográfica	Bacia Hidrográfica	Linha da Água	Capacidade total (m³)	Capacidade útil (m³)	Volume morto (m³)	Assoreamento (m³/ano)	Idade	Volume de sedimentação estimado (m³)	Área da Bacia Hidrográfica (km²)	Caudal integral médio anual (m³)	Índice de Regularização	Eficiência de Retenção (%)	Distância (Km)	Prioridade batimétrica	Albufeiras Seleccionadas
ABRILONGO	2000	Aterro	Portalegre	Campo Maior	Centro	Guadiana	Guadiana	Ribeira de Abrilongo	19,900,000	18,900,000	1,000,000		9	180,000	124				>100		
AÇAFAL	2004	Aterro	Castelo Branco	Vila Velha do Ródão	Centro	Tejo	Tejo	Ribeira do Açafal	1,790,000				5	168,267	46.5				75-100		
ÁGUA INDUSTRIAL	1990	Aterro	Beja	Aljustrel	Sul	Guadiana	Sado	Ribeira de Água Forte	864,000				19	20,473	5.6				50-75		
ÁGUAS CLARAS	1990	Aterro	Beja	Aljustrel	Sul	Guadiana	Sado	Barranco do Morgado	2,100,000				19	11,294	3.18				25-50		
AGUIEIRA	1981	Betão	Coimbra	Penacova	Centro	Mondego	Mondego	Rio Mondego	423,000,000	304,000,000	119,000,000		28	66,640,000	3100				25-50	7	1
ALCOUTIM	1995	Aterro	Faro	Alcoutim	Sul	Guadiana	Guadiana	Barranco dos Ladrões	1,000,000	908,200	91,800		14	25,704	22				25-50		
ALFAIATES	1999	Aterro	Guarda	Sabugal	Centro	Norte	Douro		854,000	650,000	204,000		10	40,800	20	12,410,000	0.0524	75.2	>100		
ALFANDEGA DA FÉ	1970	Aterro	Bragança	Alfândega da Fé	Norte	Norte	Douro	Ribeira dos Alambiques	1,600,000	1,300,000	300,000		39	234,000	0.7				>100		
ALIJO	1991	Aterro	Vila Real	Alijó	Norte	Norte	Douro	Ribeira de Chã	1,740,000	1,590,000	150,000		18	54,000	9	2,920,000	0.5445	94.7	>100		
ALQUEVA	2002	Betão	Beja	Moura	Sul	Guadiana	Guadiana	Rio Guadiana	4,150,000,000	3,150,000,000	1,000,000,000		7	140,000,000	55000	2,851,000,000	1.1049	97.5	75-100	2	1
ALTO CÁVADO	1964	Betão	Vila Real	Montalegre	Norte	Norte	Cávado	Rio Cávado	3,300,000	2,000,000	1,300,000		45	1,170,000	102				75-100		1
ALTO CEIRA	1949	Betão	Coimbra	Pampilhosa da Serra	Centro	Mondego	Mondego	Rio Ceira	1,200,000	400,000	800,000		60	800,000	48				75-100		1
ALTO LINDOSO	1992	Betão	Viana do Castelo	Ponte da Barca	Norte	Norte	Lima	Rio Lima	379,010,000	347,910,000	2,100,000		17	714,000	1525	1,329,200,000	0.2617	91.4	50-75	6	1
ALTO RABAGÃO	1964	Betão	Vila Real	Montalegre	Norte	Norte	Cávado	Rio Rabagão	568,690,000	557,920,000	10,770,000		45	9,693,000	210	180,000,000	3.0996	97.5	75-100	8	1
ALVITO	1977	Aterro	Beja	Cuba	Sul	Guadiana	Sado	Ribeira de Odivelas	132,500,000	130,000,000	2,500,000		32	1,600,000	212	40,000,000	3.2500	97.5	50-75	6	1
ALVORNINHA	2004	Aterro	Leiria	Caldas da Rainha	Centro	Mondego	Rib. Reg. Hid. Oeste	Ribeira da Alvorninha	711,000	690,000	32,000		5	3,200	3.6				<25		
ANDORINHAS	1945	Betão	Braga	Póvoa de Lanhoso	Norte	Norte	Ave	Rio Ave	12,000				64			217,900,000			25-50		
APARTADURA	1993	Aterro	Portalegre	Marvão	Centro	Tejo	Tejo	Ribeira de Reveladas	7,465,000	6,980,000	485,000		16	155,200	8.4	2,650,000	2.6340	97.5	>100	1	
ARADE	1956	Aterro	Faro	Silves	Sul	Algarve	Arade	Rio Arade	28,389,000	26,744,000	1,645,000	174040	53	9,224,120	229				<25	12	1
ARCOSSÓ	1999	Aterro	Vila Real	Chaves	Norte	Norte	Douro	Ribeira de Arcossó	4,876,000	4,553,000	323,000		10	64,600	31.1	13,720,000			>100		
ARMAMAR	2004	Aterro	Viseu	Armamar	Centro	Norte	Douro	Ribeira de Temilobos	2,900,000	2,800,000	100,000		5	10,000	6.6	2,500,000	1.1200	97.5	75-100		
AZIBO	1982	Aterro	Bragança	Macedo de Cavaleiros	Norte	Norte	Douro	Ribeira do Azibo	54,470,000	46,670,000	7,800,000		27	4,212,000	91	32,000,000	1.4584	97.5	>100	1	
BASTÊLOS	1993	Enrocamento	Bragança	Mogadouro	Norte	Norte	Douro	Ribeira de Bastelos	1,126,000	1,200,000			16	128,935	26	3,449,000	0.3479	92.7	>100		
BELICHE	1986	Aterro	Faro	Castro Marim	Sul	Guadiana	Guadiana	Ribeira de Beliche	48,000,000	47,600,000	400,000		23	184,000	117				<25		
BELVER	1952	Betão	Portalegre	Gavião	Centro	Tejo	Tejo	Rio Tejo	12,500,000	8,500,000	4,000,000		57	4,000,000	62802				75-100		1
BEMPOSTA	1964	Betão	Bragança	Mogadouro	Norte	Norte	Douro	Rio Douro	129,000,000	200,000,000	108,800,000		45	97,920,000	63850	3,339,700,000	0.0060	31.6	>100		
BOUÇÃ	1955	Betão	Leiria	Pedrogão Grande	Centro	Tejo	Tejo	Rio Zêzere	48,400,000	15,220,000	33,180,000		54	33,180,000	2525				25-50		1
BOUÇOAIS - SONIM	2004	Betão	Vila Real	Valpaços	Norte	Norte	Douro	Rio Rabaçal	1,365,000				5		867				>100		
BURGA	1978	Aterro	Bragança	Alfândega da Fé	Norte	Norte	Douro	Ribeira da Burga	1,539,000	1,383,000	156,000		31	96,720	16	2,400,000	0.5763	95.0	>100		
BURGÃES	1940	Alvenaria	Aveiro	Vale de Cambra	Centro	Mondego	Vouga	Rio Caima	408,000	330,000	78,000	885.5	69	78,000	38.5				<25	4	
CABRIL	1954	Betão	Castelo Branco	Sertã	Centro	Tejo	Tejo	Rio Zêzere	720,000,000	615,000,000	105,000,000		55	105,000,000	2340	1,577,000,000	0.3900	93.2	50-75	7	1
CAIA	1967	Aterro	Portalegre	Elvas	Centro	Guadiana	Guadiana	Rio Caia	203,000,000	192,300,000	10,700,000		42	8,988,000	571				>100	12	
CALDEIRÃO	1993	Betão	Guarda	Guarda	Centro	Mondego	Mondego	Ribeira do Caldeirão	5,520,000	3,470,000	2,050,000		16	656,000	38	116,000,000	0.0299	65.0	>100		
CAMBA	1993	Aterro	Bragança	Alfândega da Fé	Norte	Norte	Douro	Ribeira de Camba	1,110,000	1,080,000	30,000		16	9,600	6	1,720,000	0.6279	95.4	>100		
CAMPILHAS	1954	Aterro	Setúbal	Santiago do Cacém	Sul	Guadiana	Sado	Ribeira de Campilhas	27,156,000	26,156,000	1,000,000	31610	55	1,738,550	109	22,268,000	1.1746	97.5	<25	12	1
CANIÇADA	1955	Betão	Braga	Terras de Bouro	Norte	Norte	Cávado	Rio Cávado	170,600,000	159,300,000	11,300,000		54	11,300,000	783				25-50		1
CAPINHA	1981	Aterro	Castelo Branco	Fundão	Centro	Tejo	Tejo	Ribeira das Poldras	522,000	340,000	182,000		28	101,920	6.3	3,530,000	0.0963	86.3	>100		
CAROUCHA	1999	Aterro	Faro	Castro Marim	Sul	Guadiana	Guadiana	Ribeira da Caroucha	600,000	550,000	50,000		10	10,000	6.8	69	7982.5835	97.5	<25		
CARRAPATELO	1972	Betão	Porto	Marco de Canavezes	Norte	Norte	Douro	Rio Douro	148,400,000	13,840,000	134,560,000		37	99,574,400	92050	5,610,300,000	0.0025	8.5	25-50		1
CARVIÇAIS	1984	Aterro	Bragança	Torre de Moncorvo	Norte	Norte	Douro	Ribeira de Vale de Ferreiros	1,200,000	992,000	61,000		25	30,500	4	1,000,000	0.9920	97.5	>100		
CASTELO DO BODE	1951	Betão	Santarém	Tomar	Sul	Tejo	Tejo	Rio Zêzere	1,095,000,000	900,500,000	194,500,000		58	194,500,000		2,352,000,000	0.3829	93.1	50-75	7	1
CATAPEREIRO	1999	Betão	Guarda	Vila Nova de Foz Côa	Centro	Norte	Douro	Rio Teja	4,085,300	4,000,000	85,300		10	17,060	188	57,710	69.3121	97.5	>100		
CERCOSA	1994	Betão	Viseu	Vouzela	Centro	Mondego	Vouga	Rio Alfusqueiro	60,000	20,000	40,000		15	12,000					25-50		
CERRO DO LOBO	1993	Aterro	Beja	Castro Verde	Sul	Guadiana	Guadiana	Barranco das Lages	15,500,000				16	14,752	4.1				25-50		
COIMBRA	1981	Açude Móvel	Coimbra	Coimbra	Centro	Mondego	Mondego	Rio Mondego	1,600,000	620,000	980,000		28	548,800	4950	2,333,059,000	0.0003		25-50		1
CORGAS	1991	Betão	Castelo Branco	Proença-a-Nova	Centro	Tejo	Tejo	Rio Isna	660,000	534,000	126,000		18	45,360	25.3				75-100		
CORTE BRIQUE	1993	Aterro	Beja	Odemira	Sul	Guadiana	Mira	Ribeira de Corte Brique	1,636,000	1,464,000	108,000		16	34,560	14.42	2,700,000	0.5422	94.7	25-50		
COVA DO VIRIATO	1982	Betão	Castelo Branco	Covilhã	Centro	Tejo	Tejo	Ribeira dos Poios Brancos	1,500,000	1,480,000	20,000		27	10,800	2.25				>100		
COVÃO DO FERRO	1956	Alvenaria	Castelo Branco	Covilhã	Centro	Tejo	Tejo	Ribeira de Alforfa	1,100,000	870,000	230,000		53	230,000	1.92	2,900,000	0.3000	92.0	75-100		
COVÃO DO MEIO	1953	Betão	Guarda	Seia	Centro	Mondego	Mondego	Ribeira da Nave	1,400,000	1,300,000	100,000		56	100,000	4.8				75-100		
CRESTUMA-LEVER	1985	Betão	Porto	Porto	Norte	Norte	Douro	Rio Douro	110,000,000	22,500,000	87,500,000		24	42,000,000	92040	7,388,900,000	0.0030	14.0	<25	6	1
CURALHA	1985	Aterro	Vila Real	Chaves	Norte	Norte	Douro		792,000	740,000	52,000		24	24,960	5				>100		
DAROEIRA	1953	Aterro	Setúbal	Santiago do Cacém	Sul	Guadiana	Sado	Ribeira de Messejana	5,600,000				56	117,406	29.5				25-50		
DIVOR	1965	Aterro	Évora	Arraiolos	Sul	Tejo	Tejo	Ribeira do Divor	11,900,000	11,890,000	10,000		44	8,800	43	17,069,000	0.6966	95.9	50-75	7	
ENXOE	1998	Aterro	Beja	Serpa	Sul	Guadiana	Guadiana	Ribeira do Enxoé	10,400,000	9,500,000	900,000		11	198,000	60.8	8,630,000	1.1008	97.5	75-100		
FACHO I	1954	Aterro	Beja	Serpa	Sul	Guadiana	Guadiana	Barranco de João Bilheiro	1,619,000				55						75-100		
FACHO II	1955	Aterro	Beja	Serpa	Sul	Guadiana	Guadiana	Barranco Vale de Maritanças	1,454,000				54						75-100		
FAGILDE	1984	Betão	Viseu	Viseu	Centro	Mondego	Mondego	Rio Dão	2,800,000				25	1,001,079	428				75-100	4	1
FINCA RODILHAS	1996	Aterro	Faro	Alcoutim	Sul	Guadiana	Guadiana	Barranco do Alamo	317,000				13	9,769	2.77				25-50		
FONTE LONGA	1984	Aterro	Bragança	Carrazeda de Ansiães	Norte	Norte	Douro		900,000	800,000	100,000		25	50,000	3.01				>100		
FONTE SERNE	1976	Aterro	Setúbal	Santiago do Cacém	Sul	Guadiana	Sado	Ribeira de Vale Diogo	5,150,000	3,650,000	1,500,000		33	990,000	30	6,052,000	0.6031	95.2	25-50		1
FRATEL	1973	Betão	Portalegre	Vila Velha do Ródão	Centro	Tejo	Tejo	Rio Tejo	92,500,000	21,000,000	71,500,000		36	51,480,000	60000				75-100	6	1
FREIGIL	1955	Betão	Viseu	Cinfães	Centro	Norte	Douro	Rio Cabrum	140,000	138,000	2,000		54	2,000	54				25-50		
FREIXEIRINHA	1995	Aterro	Évora	Montemor-o-Novo	Sul	Tejo		Ribeira da Freixeirinha	6,700,000	6,200,000	500,000		14	140,000	38				25-50		
FRONHAS	1985	Betão	Coimbra	Arganil	Centro	Mondego	Mondego	Rio Alva	62,100,000	42,500,000	19,600,000										

Anexo A - Características das Albufeiras Analisadas

BARRAGEM	Ano de Conclusão	Tipo de Barragem	Distrito	Concelho	Região	Região Hidrográfica	Bacia Hidrográfica	Linha da Água	Capacidade total (m³)	Capacidade útil (m³)	Volume morto (m³)	Assoreamento (m³/ano)	Idade	Volume de sedimentação estimado (m³)	Área da Bacia Hidrográfica (km²)	Caudal integral médio anual (m³)	Índice de Regularização	Eficiência de Retenção (%)	Distância (Km)	Prioridade batimétrica	Albufeiras Seleccionadas
MONTARGIL	1958	Aterro	Portalegre	Ponte de Sôr	Centro	Tejo	Tejo	Ribeira de Sôr	164,300,000	142,700,000	21,600,000		51	21,600,000	1186	15,500,000	9.2065	97.5	50-75	6	1
MONTE DA ROCHA	1972	Aterro	Beja	Ourique	Sul	Guadiana	Sado	Rio Sado	104,500,000	99,500,000	5,000,000		37	3,700,000	246				25-50	10	1
MONTE NOVO	1982	Betão	Évora	Évora	Sul	Guadiana	Guadiana	Rio Degebe	15,280,000	14,780,000	500,000		27	270,000	267	44,000,000	0.3359	92.5	75-100		
MORGADO D'ARGE	1974	Aterro	Faro	Portimão	Sul	Algarve	Arade	Barranco do Coelho	1,000,000				35	7,192	2.07				<25		
MORGAVEL	1980	Aterro	Setúbal	Sines	Sul	Guadiana	Ribeiras do Alentejo	Ribeira de Morgavel	32,500,000	27,000,000	5,500,000		29	3,190,000					<25		1
NAMORADA	1996	Aterro	Beja	Beja	Sul	Guadiana	Guadiana	Barranco de Santa Luzia	1,543,000	1,507,000	35,000		13	9,100	17.58				75-100		
NUNES	1995	Betão	Bragança	Vinhais	Norte	Norte	Douro	Rio Tuela	138,000	98,000	40,000		14	11,200	406				>100		
ÓBIDOS	2005	Aterro	Leiria	Óbidos	Centro	Mondego	Rio Arnóia	Rio Arnóia	7,100,000	5,800,000	130,000		4	10,400	102.9				<25		
ODEÁXERE (BRAVURA)	1958	Betão	Faro	Lagos	Sul	Algarve	Ribeiras do Algarve	Ribeira de Odeáxere	34,825,000	32,260,000	2,565,000		51	2,565,000	76.8				<25		1
ODELEITE	1997	Aterro	Faro	Castro Marim	Sul	Guadiana	Guadiana	Ribeira de Odeleite	130,000,000	117,000,000	13,000,000		12	3,120,000	352				<25	7	1
ODIVELAS	1972	Aterro	Beja	Ferreira do Alentejo	Sul	Guadiana	Sado	Ribeira de Odivelas	96,000,000	70,000,000	26,000,000		37	19,240,000	430	80,800,000	0.8663	96.8	25-50		1
PAGADE	1994	Betão	Viana do Castelo	Vila Nova de Cerveira	Norte	Norte	Minho	Coura					15						<25		
PARADELA	1956	Aterro	Vila Real	Montalegre	Norte	Norte	Cávado	Rio Cávado	164,400,000	159,000,000	5,400,000		53	5,400,000	269				50-75	8	1
PEDRÓGÃO	2005	Betão	Beja	Vidigueira	Sul	Guadiana	Guadiana	Rio Guadiana	106,000,000	54,000,000	52,000,000		4	4,160,000	59160				75-100		1
PEGO DO ALTAR	1949	Aterro	Setúbal	Alcácer do Sal	Sul	Guadiana	Sado	Ribeira das Alcáçovas	94,000,000	93,600,000	400,000		60	400,000	743				<25	7	1
PENEDO REDONDO	1935	Alvenaria	Castelo Branco	Castelo Branco	Centro	Tejo	Tejo	Rio Ocreza	58,000				74	9,386	1.28				>100		
PENEIREIRO	1973	Aterro	Bragança	Vila Flor	Norte	Norte	Douro	Ribeira do Arco	768,000	670,000	98,000		36	70,560	2.5	475,000	1.4105	97.5	>100		
PENHA GARCIA	1979	Betão	Castelo Branco	Idanha-a-Nova	Centro	Tejo	Tejo	Rio Ponsul	1,070,000	1,001,000	68,000		30	40,800	15.2	4,164,000	0.2404	91.0	>100		
PENIDE	1951	Alvenaria	Braga	Barcelos	Norte	Norte	Cávado	Rio Cávado	500,000				58		1324	1,928,000,000			<25		
PICOTE	1958	Betão	Bragança	Miranda do Douro	Norte	Norte	Douro	Rio Douro	63,000,000	13,430,000	49,350,000		51	49,350,000	63750	3,393,300,000	0.0040	20.8	>100		
PISCO	1968	Aterro	Castelo Branco	Castelo Branco	Centro	Tejo	Tejo	Ribeira de S. Vicente	1,400,000	1,040,000	113,000		41	92,660	14.2	4,200,000	0.2476	91.1	>100		
POCINHO	1982	Betão	Guarda	Vila Nova de Foz Côa	Centro	Norte	Douro	Rio Douro	83,070,000	12,240,000	70,830,000		27	38,248,200	81005	4,679,900,000	0.0026	10.1	>100	7	
POIO	1932	Betão	Portalegre	Nisa	Centro	Tejo	Tejo	Ribeira de Nisa	6,400,000	4,600,000	1,800,000		77	1,800,000					>100		
PORCHES	1991	Aterro	Setúbal	Alcácer do Sal	Sul	Guadiana	Sado	Barranco do Taralhão	738,000	700,000	38,000		18	13,680	9.87				<25		
PÓVOA	1928	Betão	Portalegre	Castelo Branco	Centro	Tejo	Tejo	Ribeira de Nisa	22,000,000	18,800,000	3,200,000		81	3,200,000					>100		
PRACANA	1950	Betão	Santarém	Mação	Sul	Tejo	Tejo	Rio Ocreza	111,900,000	69,000,000	42,900,000		59	42,900,000	1410	611,000,000	0.1129	87.6	75-100	6	1
PRADA	1995	Aterro	Bragança	Vinhais	Norte	Norte	Douro	Ribeira da Videira	247,000	233,000	14,000		14	3,920	3.63				>100		
QUEIMADELA	1993	Betão	Braga	Fafe	Norte	Norte	Ave	Rio Vizela	1,100,000	870,000	230,000		16	73,600	26				25-50		
RAIVA	1981	Betão	Coimbra	Penacova	Centro	Mondego	Mondego	Rio Mondego	24,110,000	14,710,000	9,400,000		28	5,264,000					25-50		1
RANHADOS	1986	Betão	Guarda	Meda	Centro	Norte	Douro	Rio Torto	2,570,000	1,790,000	780,000		23	358,800	47.3	13,600,000	0.1316	88.3	>100	4	
REBORDELO	2004	Betão	Bragança	Vinhais	Norte	Norte	Douro	Rio Rabçal	312,000,000	263,000			5	1,937,840	846				>100		
REGO DO MILHO	2005	Aterro	Bragança	Chaves	Norte	Norte	Douro	Ribeiro do Milho	1,880,000				4	18,197	2.1				>100		
RÉGUA	1973	Betão	Vila Real	Peso da Régua	Norte	Norte	Douro	Rio Douro	95,000,000	12,000,000	83,000,000		36	59,760,000	90800	5,203,400,000	0.0023	6.8	75-100		1
REJETADOS	1990	Aterro	Beja	Aljustrel	Sul	Guadiana	Sado	Barranco do Morgado	3,460,000				19	2,267	0.69				25-50		
RIBEIRA DO PAÚL	2004	Aterro	Viseu	Tondela	Centro	Mondego	Mondego	Ribeira do Paúl	2,400,000	2,300,000	100,000		5	10,000	5				50-75		
RIO DA MULA	1969	Aterro	Lisboa	Cascais	Centro	Tejo	Rib. Reg. Hid. Oeste	Rio da Mula	340,000	230,000	110,000		40	88,000	2.9				<25	8	
ROUCANITO	1975	Aterro	Évora	Alandroal	Sul	Guadiana	Guadiana	Ribeiro do Peral	519,000	483,000	36,000		34	24,480	17.8	4,101,000	0.1178	87.7	>100		
ROXO	1967	Aterro	Beja	Aljustrel	Sul	Guadiana	Sado	Ribeira do Roxo	96,311,000	89,511,000	6,800,000		42	5,712,000	351				50-75	12	1
S. DOMINGOS	1993	Aterro	Leiria	Peniche	Centro	Mondego	Rib. Reg. Hid. Oeste	Ribeira de S. Domingos	7,900,000	7,550,000	300,000		16	96,000	40	3,900,000	1.9359	97.5	<25	6	
SABUGAL	2000	Aterro	Guarda	Sabugal	Centro	Norte	Douro	Rio Côa	114,300,000	10,400,000	103,900,000		9	18,702,000	130				>100		
SALAMONDE	1953	Betão	Braga	Vieira do Minho	Norte	Norte	Cávado	Rio Cávado	65,000,000	56,300,000	8,700,000		56	8,700,000	642				50-75		1
SALGUEIRO	1977	Aterro	Bragança	Alfândega da Fé	Norte	Norte	Douro	Ribeira do Salgueiro	1,800,000	1,650,000	150,000		32	96,000	3.85	1,600,000	1.0313	97.5	>100		
SANTA CLARA	1968	Aterro	Beja	Odemira	Sul	Guadiana	Mira	Rio Mira	485,000,000	240,300,000	244,700,000		41	200,654,000	520	90,600,000	2.6523	97.5	25-50	7	1
SANTA JUSTA	2005	Aterro	Bragança	Alfândega da Fé	Norte	Norte	Douro	Ribeira de Santa Justa	3,476,000				4	160,320	34.4				>100		
SANTA LUZIA	1942	Betão	Coimbra	Pampilhosa da Serra	Centro	Tejo	Tejo	Rio Unhais	53,700,000	51,000,000	2,700,000	15500	67	2,700,000	50				75-100		1
SANTA Mª DE AGUIAR	1981	Aterro	Guarda	Figueira de Castelo Rodrigo	Centro	Norte	Douro	Ribeira de Aguiar	5,400,000	5,120,000	280,000		28	156,800	128.5	16,700,000	0.3066	92.1	>100	3	
SENHORA DE MONFORTE	1993	Betão	Guarda	Figueira de Castelo Rodrigo	Centro	Norte	Douro	Rio Côa	87,300	35,900	51,400		16	16,448	1100	341,850,000	0.0001		>100		
SERRA SERRADA	1989	Betão	Bragança	Bragança	Norte	Norte	Douro	Ribeira das Andorinhas	1,680,000	1,500,000	180,000		20	72,000	6.7	7,170,000	0.2092	90.4	>100		
SOBRENA	1997	Aterro	Lisboa	Cadaval	Centro	Mondego	Rib. Reg. Hid. Oeste		450,000	380,000	70,000		12	16,800					<25		
SORDO	1997	Betão	Vila Real	Vila Real	Norte	Norte	Douro	Rio Sordo	1,000,000	850,000	150,000		12	36,000	48	76,000,000	0.0112	47.0	50-75		
TABUEIRA	1976	Aterro	Évora	Montemor-o-Novo	Sul	Tejo	Tejo	Ribeira dos Pombos	3,500,000				33	64,559	16.7				25-50		
TAPADA	1913	Alvenaria	Setúbal	Grândola	Sul	Guadiana	Sado	Ribeira de Espinhaço de Cão	750,000				96						25-50		
TAPADA GRANDE	1882	Aterro	Beja	Mértola	Sul	Guadiana	Guadiana	Barranco do Cabeça de Aires	5,000,000				127						25-50		
TEJA	1995	Aterro	Guarda	Transcoso	Centro	Norte	Douro	Rio Teja	2,805,000	2,743,000	62,000		14	17,360	35.5	9,970,000	0.2751	91.6	>100		
TORRÃO	1988	Betão	Porto	Marco de Canavezes	Norte	Norte	Douro	Rio Tâmega	124,000,000	77,000,000	47,000,000		21	19,740,000	3252.1	2,110,800,000	0.0365	68.6	25-50	6	1
TOULICA	1979	Aterro	Castelo Branco	Idanha-a-Nova	Centro	Tejo	Tejo	Ribeira da Toulica	2,020,000	1,590,000	430,000		30	258,000	26				>100	6	
TOUVEDO	1993	Betão	Viana do Castelo	Ponte da Barca	Norte	Norte	Lima	Rio Lima	15,500,000	4,500,000	11,000,000		16	3,520,000	1700	1,692,000,000	0.0027	10.5	25-50	6	1
VALE DA TELHA	1983	Aterro	Faro	Aljezur	Sul	Algarve	Ribeiras do Algarve	Barranco do Monte Clérigo	2,000,000				26	78,032	20				<25		
VALE DAS BICAS	1939	Aterro	Évora	Vendas Novas	Sul	Guadiana	Sado	Ribeira da Landeira	2,000,000				70	256,296	62	14,000,000			<25		1
VALE DE FIGUEIRA	1955	Aterro	Évora	Mora	Sul	Tejo	Tejo	Ribeira da Barroca	1,000,000				54						25-50		
VALE DO COBRÃO	1982	Aterro	Santarém	Benavente	Sul	Tejo	Tejo	Ribeira do Vale Cobrão	6,200,000				27	417,817	98.7	6,480,000			<25		1
VALE DO GAÍO	1949	Aterro	Setúbal	Alcácer do Sal	Sul	Guadiana	Sado	Rio Xarrama	63,000,000	55,000,000	8,000,000		60	8,000,000	509	59,644,000	0.9221	97.1	25-50		1
VALE DO ROSSIM	1956	Betão	Guarda	Gouveia	Centro	Mondego	Mondego	Ribeira da Fervença	3,500,000	3,400,000	100,000		53	100,000	5.4				75-100		
VALE MADEIRO	2004	Aterro	Bragança	Mirandela	Norte	Norte	Douro	Ribeira de Mourel	1,509,000	1,335,000	174,000		5	17,400	44				>100		
VALE SOEIRO	1994	Betão	Viseu	Castro Daire	Centro	Norte	Douro	Rio Paiva	65,000,000	61,000,000			15	732,246	290				50-75		1
VALEIRA	1975	Betão	Viseu	S. João da Pesqueira	Centro	Norte	Douro	Rio Douro	97,000,000	11,500,000	85,500,000		34	58,140,000	85400	4,755,600,000	0.0024	8.0	>100		
VAQUEIROS	1995	Aterro	Faro	Alcoutim																	

Anexo B - Principais características das albufeiras que integram a nova rede sedimentológica (Álvares, *et al.* (2001))

Nome	Curso de Água	Bacia Hidrográfica	Batimetria existente					Região	Prioridade batimétrica
Agueira	Mondego	Mondego						Centro	7
Alqueva	Guadiana	Guadiana						Sul	2
Alto Lindoso	Lima	Lima						Norte	6
Alto Rabagão	Rabagão	Cávado						Norte	8
Alvito	Ribeira Odivelas	Sado						Sul	6
Apartadura	Ribeira Reveladas	Tejo						Sul	1
Arade	Rio Arade	Algarve	1958	1986	1973	1981	1998	Sul	12
Azibo	Azibo	Douro						Norte	1
Bravura	Ribeira Odeáxere	Algarve	1955	1985				Sul	4
Burgães	Caima	Vouga						Centro	7
Cabril	Zêzere	Tejo						Centro	12
Caia	Caia	Guadiana	1973	1981				Sul	12
Campilhas	Ribeira Campilhas	Sado	1954	1986				Sul	7
Castelo Bode	Zêzere	Tejo						Centro	6
Crestuma-Lever	Douro	Douro						Norte	7
Divor	Divor	Tejo						Sul	4
Fagilde	Dão	Mondego						Centro	6
Fratel	Tejo	Tejo						Centro	8
Funcho	Arade	Algarve						Sul	7
Guilhofrei	Ave	Ave						Norte	8
Idanha	Ponsul	Tejo	1963					Centro	9
Maranhão	Ribeira de Seda	Tejo						Sul	8
Miranda	Douro	Douro						Norte	6
Montargil	Sôr	Tejo						Sul	10
Monte da Rocha	Sado	Sado	1947	1985				Sul	10
Nossa Senhora do Desterro	Alva	Mondego						Centro	4
Odeleite	Ribeira Odeleite	Guadiana						Sul	7
Paradela	Cávado	Cávado						Norte	8
Pego Altar	Ribeira Alcaçovas	Sado						Sul	7
Pocinho	Douro	Douro						Norte	7
Pracana	Ocreza	Tejo						Centro	6
Ranhados	Torto	Douro						Centro	4
Rio Mula	Mula	Oeste						Centro	8
Roxo	Ribeira do Roxo	Sado	1934	1979				Sul	12
Salamonde	Cávado	Cávado						Norte	7
Santa Clara	Mira	Mira						Sul	7
Santa Maria Aguiar	Ribeira Aguiar	Douro						Centro	3
São Domingos	São Domingos	Oeste						Centro	6
Torrão	Tâmega	Douro						Norte	6
Toulíca	Ribeira da Toulíca	Tejo						Centro	6
Touvedo	Lima	Lima						Norte	6
Varosa	Varosa	Douro						Centro	6
Vigia	Ribeira do Vale do Vasco	Guadiana	1988					Sul	10
Vilarinho das Furnas	Homem	Cávado						Norte	9
Vilar-Tabuaco	Távora	Douro						Centro	6